



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la  
communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle  
comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten**

**Risikobeurteilung für Kunstbauten**

**Appréciation des risques pour les ouvrages d'art**

**Risk assessment for highway structures**

**Ernst Basler + Partner AG:**  
**dipl. Ing. ETH Charles Fermaud**  
**Dr. sc. techn. dipl. Ing. TH Frank Stenger**

**Risk&Safety AG:**  
**Dr. sc. techn. dipl. Ing. ETH Alex Scheiwiller**

**Prof. Ph.D. dipl. Ing. ETH Manfred A. Hirt**

**Forschungsauftrag AGB 2005/108 auf Antrag der  
Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)**

**März 2010**

**624**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en).  
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes.  
Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade.  
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) appointed by the Swiss federal roads authority.  
Supply: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten**

**Risikobeurteilung für Kunstbauten**

**Appréciation des risques pour les ouvrages d'art**

**Risk assessment for highway structures**

**Ernst Basler + Partner AG:**  
**dipl. Ing. ETH Charles Fermaud**  
**Dr. sc. techn. dipl. Ing. TH Frank Stenger**

**Risk&Safety AG:**  
**Dr. sc. techn. dipl. Ing. ETH Alex Scheiwiller**

**Prof. Ph.D. dipl. Ing. ETH Manfred A. Hirt**

**Forschungsauftrag AGB 2005/108 auf Antrag der  
Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)**

## Impressum

### Forschungsauftrag

Forschungspaket AGB1: Sicherheit des Verkehrssystems Strasse u. dessen Kunstbauten  
Teilprojekt AGB 2005/108: Risikobeurteilung für Kunstbauten  
Antragsteller: Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

### Auftraggeber

Bundesamt für Strassen, ASTRA

### Gesamtprojektleitung

**Emch+Berger AG Bern**  
**Gartenstrasse 1, 3001 Bern**  
Beat Schneeberger  
Mathias Kost (Stv.)

### Auftragnehmer

**Ernst Basler + Partner AG**  
**Zollikerstrasse 65, 8702 Zollikon**  
Charles Fermaud (Projektleitung)  
Frank Stenger  
Vasiliki Malioka

**Risk&Safety AG**  
**Hofstrasse 17, 5073 Gipf-Oberfrick**  
Alex Scheiwiller

**Manfred A. Hirt**  
**Chemin du Prumay 9, 1026 Echandens**

### Begleitkommission

#### Präsident

Michel Donzel

#### Mitglieder

Walter Ammann, Reto Baumann, Jachen Cajos, Heinrich Figi, Armand Fürst, Joseph Jacquemoud, Alain Jeanneret, Marc Florian Laube, Hans Peter Lindenmann, Thierry Pucci, Jean-Christophe Putallaz, Willi Schuler, Dario Somaini, Jörg Thoma

### Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch) herunter geladen werden.

# Schlussberichte Teilprojekte – Vorwort

Das Forschungsprojekt *Risikobeurteilung für Kunstbauten* ist ein Teilprojekt des Forschungspakets AGB1 ‚Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten‘, das im Rahmen der Forschung im Strassenwesen von der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB) initiiert und vom ASTRA finanziert wurde. Es liefert einen relevanten Beitrag zum Forschungsschwerpunkt *Strassen- und Verkehrssicherheit* der Forschungsstrategie im Strassenwesen 2004 - 2007. Zu dieser Strategie gehört, nebst den Schwerpunkten, die Absicht den Programmcharakter der Forschung zu verstärken, unter anderem durch die Bildung von Forschungspaketen, um ein Thema mit abgestimmten Projekten umfassend zu behandeln.

Das Ziel des Forschungspakets AGB1 ist es, zuhanden der Strassenverwaltungen Entscheidungsgrundlagen und Methoden bereitzustellen, die es ihnen ermöglichen, begrenzte, finanzielle Mittel zielgerichtet und zweckmässig einzusetzen, um den erforderlichen Sicherheitsstandard über das gesamte Verkehrssystem Strasse zu erreichen und zu erhalten. Dies erfordert Methoden, um Risiken der unterschiedlichen Sicherheitsbereiche, wie Verkehrsgeschehen, Naturgefahren, Störfälle usw. zu beurteilen und untereinander vergleichbar zu machen und ausgewogene und effiziente Massnahmen zur Risikobegrenzung zu bestimmen.

Das Verkehrssystem Strasse besteht aus der Strasseninfrastruktur und dem darauf stattfindenden Verkehrsgeschehen. Zum Gesamtsystem gehören zudem der Betreiber der Infrastruktur, die Verkehrsteilnehmer, das unmittelbare Umfeld, sowie die Prozesse zum Bau, Unterhalt und Betrieb des Systems.

Das Thema des Forschungspaket AGB1 entspricht dem allgemein bestehenden Trend zur vermehrten Anwendung eines risikobasierten Ansatzes bei der Planung und im Management von Infrastrukturen. Dieser Ansatz ist in verschiedenen Sicherheitsbereichen, wie Störfälle, Naturgefahren usw. bereits Usanz. In anderen Bereichen, wie Kunstbauten, Verkehrssicherheit usw. besteht er nicht oder nur ansatzweise. Dies behindert die ausgewogene Gesamtbetrachtung und den Vergleich unter den Bereichen. Ein Wechsel des Ansatzes ist jedoch nicht nur ein technisches und methodisches Thema, sondern ist auch aus der Sicht der Rechtsetzung, Normung und Rechtsprechung zu betrachten.

Das Forschungspaket AGB1 besteht aus 9 Teilprojekten, welche in zwei Gruppen zusammengefasst sind. Die Teilprojekte der ersten Gruppe befassen sich mit dem Gesamtsystem Strasse. Die zweite Gruppe bildet die Vertiefung und Konkretisierung im Teilsystem Kunstbauten. AGB1 besteht aus den folgenden Teilprojekten:

## *Gesamtsystem Strasse*

AGB 2005/102	Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	Bericht Nr. 618
AGB 2005/103	Ermittlung des Netzrisikos	Bericht Nr. 619
AGB 2005/104	Effektivität und Effizienz von Massnahmen	Bericht Nr. 620
AGB 2005/105	Szenarien der Gefahrenentwicklung	Bericht Nr. 621
AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	Bericht Nr. 622

## *Teilsystem Kunstbauten*

AGB 2005/107	Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	Bericht Nr. 623
AGB 2005/108	Risikobeurteilung für Kunstbauten	Bericht Nr. 624
AGB 2005/109	Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	Bericht Nr. 625
AGB 2005/110	Baustellensicherheit bei Kunstbauten	Bericht Nr. 626

Die frühere Forschungsarbeit „Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten“ bildet die Grundlage der entwickelten Methodik für die Risikobeurteilung.

Die in AGB1 erarbeiteten Methoden bilden Instrumente und Werkzeuge, welche die Strassenverwaltungen in ihrem Risikomanagement einsetzen können. Die Art des Einsatzes und die Ausgestaltung der entsprechenden Prozesse und Richtlinien liegen in deren eigenem Zuständigkeitsbereich. Die Ergebnisse des Forschungspaketes AGB1 sollen insbesondere als Grundlage für den Aufbau eines Risikomanagementsystems beim ASTRA dienen.

Zur Sicherstellung der Anwendbarkeit der entwickelten Methoden wurde im Rahmen von AGB1 in einem separaten Projekt ‚*Testregion*‘ ein Praxistest durchgeführt. Aufgrund der Erkenntnisse aus diesem Methodiktest wurden die Methoden teilweise noch angepasst.

Zu jedem Teilprojekt und zum Projekt Testregion besteht je ein Forschungsbericht, der in sich abgeschlossen ist. Er ist jedoch im oben beschriebenen Gesamtrahmen des Forschungspaketes zu betrachten. Zum gesamten Forschungspaket AGB1 besteht ein Synthesebericht. Dieser stellt die Gesamtsicht des Forschungsergebnisses von AGB1 und seinen Teilprojekten dar.

Für die direkte Anwendung von Ergebnissen dieses Forschungsberichts in der Praxis haften allein die Anwendenden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Schlussberichte Teilprojekte – Vorwort</b> .....	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>9</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>13</b>
<b>Summary</b> .....	<b>17</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>20</b>
1.1 Ausgangslage .....	20
1.2 Zielsetzung für das Projekt .....	20
1.3 Vorgehen im Projekt.....	21
<b>2 Fragestellung</b> .....	<b>22</b>
2.1 Mögliche Fragestellungen .....	22
2.2 Ziele und Anforderungen an die Methodik.....	23
2.3 Bezug zu Teilprojekten 102 und 104.....	24
2.4 Abgrenzungen.....	25
<b>3 Auslegeordnung</b> .....	<b>26</b>
3.1 Kunstbauten.....	26
3.1.1 Übersicht.....	26
3.1.2 Brücken .....	27
3.1.3 Galerien .....	28
3.1.4 Tunnel.....	29
3.1.5 Überdeckungen.....	29
3.1.6 Durchlässe, Düker und Werkleitungskulissen .....	29
3.1.7 Stützbauwerke .....	30
3.1.8 Schutzbauwerke.....	30
3.1.9 Lärmschutzbauwerke .....	30
3.2 Einwirkungen .....	31
3.2.1 Übersicht.....	31
3.2.2 Ständige Einwirkungen.....	32
3.2.3 Einwirkungen aus Naturgefahren.....	32
3.2.4 Einwirkungen aus Strassenverkehr.....	33
3.2.5 Sonstige Einwirkungen.....	34
3.2.6 Bauwerksimmanente Ursachen .....	34
3.3 Konsequenzen .....	35
<b>4 Vorgehen</b> .....	<b>37</b>
4.1 Überblick.....	37
4.2 Selektion.....	38
4.2.1 Ziel der Selektion .....	38
4.2.2 Bedeutung und Anwendung .....	38
4.2.3 Selektionskriterien.....	38
4.3 Grobanalyse.....	39
4.4 Detailanalyse .....	40
<b>5 Risikoermittlung</b> .....	<b>41</b>
5.1 Risikobegriff .....	41
5.2 Umgang mit Unsicherheit .....	41
5.3 Ereignisraten.....	42
5.4 Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerksteils.....	44
5.4.1 Grenzzustandsfunktionen.....	44
5.4.2 Methodischer Ansatz.....	45
5.4.3 Bandbreite bei der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit .....	47
5.5 Gesamtversagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerks .....	50
5.6 Konsequenzen .....	52
<b>6 Risikobewertung</b> .....	<b>54</b>
6.1 Bewertungsmethodik.....	54
6.2 Akzeptanzkriterien.....	56

<b>7</b>	<b>Anwendung der Methodik.....</b>	<b>59</b>
7.1	Fragestellungen .....	59
7.2	Vorgehen .....	59
7.3	Fazit.....	59
<b>8</b>	<b>Folgerungen und Ausblick.....</b>	<b>61</b>
8.1	Zusammenfassung der Erkenntnisse .....	61
8.2	Vergleich mit den Zielen und Anforderungen an die Methodik.....	62
	8.2.1 Ziele und Anforderungen .....	62
	8.2.2 Anwendung der Methodik auf Populationen.....	63
	8.2.3 Anwendung der Methodik auf Einzelobjekte.....	64
8.3	Folgerungen.....	65
8.4	Offene Fragen und Forschungsbedarf .....	67
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>68</b>
	<b>Abkürzungen.....</b>	<b>71</b>
	<b>Projektabschluss .....</b>	<b>72</b>

## Zusammenfassung

### Aufgabenstellung und Ziele

Mit dem Forschungspaket AGB1 werden den Strassenverwaltungen Methoden zur Verfügung gestellt, die es ihnen ermöglichen, begrenzte finanzielle Mittel für Investitionen in die Sicherheit zielgerichtet einzusetzen, um ein angemessenes Sicherheitsniveau über das gesamte Verkehrssystem Strasse zu erreichen.

Im Bereich der Kunstbauten erfordert dies Methoden, mit denen Risiken von Einzelobjekten und Objektgruppen beurteilt und miteinander verglichen sowie Massnahmen zur Risikoreduzierung beurteilt werden können. Die grosse Anzahl und die Diversität der Kunstbauten und möglichen Einwirkungen stellen besondere Herausforderungen an eine solche Methodik dar.

Risikoorientierte Ansätze, mit denen explizit Risiken eines oder mehrerer Objekte ermittelt werden, haben im Bereich der Kunstbauten bisher kaum Anwendung gefunden. Die Sicherheitsprüfung von Kunstbauten beruht heute auf unterschiedlichen Beurteilungsmethoden, Annahmen für Lasteinwirkungen und Widerständen sowie einem uneinheitlichen Umgang mit Unsicherheiten. Für die Gewährleistung der Sicherheit gegen Lasteinwirkungen werden Sicherheitsnachweise erbracht, aus denen das Risiko eines Tragwerkversagens nicht hervorgeht.

Die im Teilprojekt 108 zu erarbeitende Methodik der Risikobeurteilung für Kunstbauten soll auf der im Teilprojekt 102 entwickelten Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung über das gesamte Verkehrssystem Strasse aufbauen. Die Methodik soll sowohl die Behandlung ganzer Populationen von Kunstbauten als auch die Betrachtung von Einzelobjekten ermöglichen. Wesentliche Anforderungen zur Anwendung auf Populationen bzw. auf Einzelobjekte sind im Folgenden aufgeführt.

Bei der Anwendung auf Populationen:

- Übersicht und Vergleich der Risiken ausgewählter Kunstbautentypen, Einwirkungen oder Regionen ermöglichen.
- Vergleich und Priorisierung der Risiken innerhalb ausgewählter Kunstbautentypen (Einwirkungen, Tragwerksteile, andere definierte Parameter).
- Ermittlung spezifischer Schwachstellen von Kunstbautentypen (Risikoschwerpunkte innerhalb eines Kunstbautentyps)
- Priorisierung und Optimierung netzweit wirkender Massnahmen zur Reduktion der Risiken im Gesamtnetz (generelle Massnahmen beurteilen können)
- Ermittlung des Stellenwerts der Risiken der Kunstbauten gegenüber anderen Risiken (Risikovergleich ermöglichen)

Bei der Anwendung auf Einzelobjekte:

- Risikoermittlung am Einzelobjekt für alle oder ausgewählte Einwirkungen, Tragwerksteile, etc.
- Massnahmenbeurteilung und Vergleich von Massnahmenvarianten bei einem Einzelobjekt
- Massnahmenpriorisierung und Rangierungen von Einzelobjekten innerhalb beschränkter Objektinventare
- Beurteilung der Akzeptanz von Risiken am Einzelobjekt

### **Begriff des Risikos von Kunstbauten**

Im Rahmen des vorliegenden Teilprojekts wird das Risiko  $R$  von Kunstbauten in Anlehnung an das Teilprojekt 102 in allgemeiner Form wie folgt berechnet:

$$R_j = \sum (h_j \cdot p_{fj} \cdot C_j)$$

mit der Ereignisrate  $h_j$ , der Versagenswahrscheinlichkeit  $p_{fj}$  im Eintretensfall eines Ereignisses, den Konsequenzen  $C_j$  und dem Index der Ereignisszenarien  $j$ . Das Summenzeichen steht für die Risiken über alle betrachteten Einwirkungen bzw. Einwirkungskombinationen und Konsequenzen.

### **Vorgehen bei der Risikoermittlung**

Die Methodik zur Risikobeurteilung für Kunstbauten enthält ein schrittweises Vorgehen bei der Ermittlung der Risiken. Ziel dieses Vorgehens ist es, die Bearbeitungstiefe auf die Fragestellung abzustimmen und einzugrenzen. Das Vorgehen besteht aus den Elementen "Selektion", "Grobanalyse" und "Detailanalyse". Das Ergebnis der Risikoermittlung sind erwartete Konsequenzen, ausgedrückt in Todesopfer, Verletzte, CHF, etc. pro Jahr.

#### **Selektion**

Durch die Selektion werden die risikorelevanten Objekte aus der Population eines Strassennetzes herausgefiltert. Die Festlegung der dazu erforderlichen Selektionskriterien erfolgt auf der Basis von Erfahrung durch Fachleute. Resultat der Selektion sind Gruppen von Kunstbauten, die vertieft zu untersuchen sind.

#### **Grobanalyse**

Die Grobanalyse bezieht sich auf eine Population von Kunstbauten, die durch eine Selektion eingegrenzt wurde. Die Grobanalyse liefert einen Überblick über die Risiken dieser Population. Zudem ist eine grobe Massnahmenbeurteilung möglich.

Die Ermittlung des Risikos umfasst die Bestimmung der Ereignisrate  $h_j$ , der Versagenswahrscheinlichkeit  $p_{fj}$  im Eintretensfall eines Ereignisses und der Konsequenzen  $C_j$ . Die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerks bzw. relevanter Tragwerksteile erfolgt mit Hilfe eines probabilistischen Ansatzes, der den Widerstand eines Bauwerks bzw. eines Tragwerksteils den Einwirkungen gegenüberstellt.

Die Grobanalyse lässt bezüglich Detaillierungsgrad und Aufwand, der für die Analyse betrieben wird, Spielraum offen. Insbesondere bei der Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit und der Berücksichtigung von Abhängigkeiten bei Konsequenzen und Versagensmechanismen besteht Spielraum im Tiefgang der Analyse.

Sind die Ergebnisse der Risikobeurteilung nicht ausreichend aussagekräftig, so ist eine Detailanalyse durchzuführen. Dies ist der Fall, wenn

- präzise Aussagen zur Akzeptanz von Risiken erforderlich sind,
- in der Grobanalyse hohe Risiken ausgewiesen werden oder
- eine präzise, objektspezifische Massnahmenplanung (insbesondere im Kontext mit der Akzeptanz von Risiken) durchzuführen ist.

#### **Detailanalyse**

In der Detailanalyse wird eine umfassende Risikoanalyse am einzelnen Objekt durchgeführt. Die Risiken werden unter Berücksichtigung detaillierter objektspezifischer Eigenheiten auf Einwirkungs- und Bauwerksseite differenziert beurteilt. Der Detaillierungsgrad einer solchen Risikobeurteilung führt zu einem entsprechend hohen Aufwand für die Risikoanalyse. Die Detailanalyse wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt.

### **Risikobewertung**

In der Risikobewertung werden die im Rahmen der Risikoermittlung bestimmten Risiken einheitlich in CHF ausgedrückt und anhand der festgelegten Kriterien bewertet (Optimierung und Akzeptanz). Die Risikobewertung für Kunstbauten folgt der Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung des Teilprojekts 102. Die Methodik des Teilprojekts 108 unterscheidet für die Risikobewertung von Kunstbauten eine betriebswirtschaftliche und eine volkswirtschaftliche Sicht.

Indirekte Konsequenzen auf Grund des Ausfalls eines Bauwerks und einem entsprechenden Streckenausfall (Netzrisiken) werden nicht im Rahmen der Methodik für die Risikobeurteilung von Kunstbauten ermittelt.

### **Folgerungen**

Das Projekt zeigt deutlich das Spannungsfeld zwischen exakter, detaillierter Analyse eines Einzelobjektes und der Anwendung in grossen Populationen. Auch wenn die Methodik grundsätzlich für beide Fragestellungen anwendbar ist, werden Grenzen entweder in der Qualität der Aussagen beim Einzelobjekt oder beim Bearbeitungsaufwand in einer grossen Population sichtbar.

Die Beschreibung der vorliegenden Methodik fokussiert auf die Stufe der Grobanalyse. Auf dieser Stufe ist der grösste Bedarf, effizient zu Risikoergebnissen zu kommen. Die Stufe der Detailanalyse kann sich stärker auf bereits etablierte Ansätze der probabilistischen Modellierung und Bemessung abstützen.

Die entwickelte Methodik des Teilprojekts 108 lässt grossen Spielraum offen bezüglich Detaillierungsgrad der Analyse und dem damit verbundenen Analyseaufwand. Dieser Spielraum ist zwingend erforderlich, um je nach Fragestellung eine adäquate Aussage zu ermöglichen (ausreichende Aussagekraft mit vertretbarem Analyseaufwand). Sollen Risiken ganzer Populationen dargestellt werden, kann die Risikobeurteilung in vereinfachter Form durchgeführt werden. Soll hingegen eine detaillierte Analyse der Risiken und Beurteilung von Massnahmen an einem einzelnen Objekt erfolgen, kann ein höherer Detaillierungsgrad mit weniger Vereinfachungen und Annahmen angemessen sein. Es ist daher nicht sinnvoll, die Methodik für die Risikobeurteilung von Kunstbauten zu eng zu definieren.

### **Anwendung der Methodik**

Je offener die Methodik gehalten ist, um die verschiedenen Fragestellungen angemessen abdecken zu können, desto weniger reproduzierbar sind die Ergebnisse (reproduzierbar im Sinne, dass verschiedene Anwender auf das gleiche Ergebnis kommen). Es sind starke Eingrenzungen der Fragestellungen und standardisierte Methoden erforderlich, wenn die Reproduzierbarkeit erhöht werden soll. Diese sind im Vorfeld einer breiten Anwendung der Methodik des Teilprojekts 108 vorzunehmen.

Das breite Spektrum von Kunstbauten und die Zahl unterschiedlicher Fragestellungen erfordern – wie ausgeführt – eine Methodik, die Spielraum offen lässt. Der Umgang damit ist anspruchsvoll und bedingt zum einen fundierte Kenntnisse zu Fragen der Risikobeurteilung nach der Methodik des Teilprojekts 102 voraus. Zum anderen ist Fachwissen in der probabilistischen Modellierung von Einwirkungen und Tragwerksysteme notwendig. Beides zusammen grenzt den Anwenderkreis stark ein.

Es ist wichtig, die für die Umsetzung der Methodik des vorliegenden Teilprojekts erforderlichen zusätzlichen Forschungstätigkeiten auszuführen und durch Anwenden der Methodik Erfahrung zu sammeln.

### **Forschungsbedarf**

Es ist zweckmässig, eine systematische Übersicht über die Selektionskriterien im Rahmen eines qualitativen Beurteilungsprozesses von einem Gremium erfahrener Fachleute zu erstellen:

- Identifizieren risikorelevanter Schwachstellen bei Kunstbauten
- Festlegen risikorelevanter Einwirkungen

Die Eingrenzung des Aufwands, die Vereinfachung der Anwendung und die Anforderung, Resultate reproduzierbar zu machen, erfordern Vereinfachungen, Annahmen und Standardisierungen einzelner Bereiche der Methodik des Teilprojekts 108.

Um trotzdem differenzierte Aussagen zu ermöglichen, ist es ausgehend von der beschriebenen Selektion erforderlich, für massgebliche und eng eingegrenzte Fragestellungen Methoden für die Risikoermittlung zu entwickeln. Für das Beispiel einer Steinschlaggalerie könnten dies folgende, eingegrenzte Themen sein: "Felssturz auf Galerie", "Anprall an Stütze".

Da die Entwicklung entsprechender anwenderbezogener Methoden zeitaufwändig ist und trotzdem nicht alle Fragestellungen damit abgedeckt werden können, ist es sinnvoll, schrittweise vorzugehen und zunächst einmal die bestehende Methodik anzuwenden, Erfahrungen zu sammeln und zu verifizieren.

Für zahlreiche Parameter der Risikoermittlung wurden in bisherigen Fallbeispielen Annahmen getroffen. Es ist angebracht, Annahmen, die in verschiedenen Risikobeurteilungen getroffen werden, systematisch zusammenzustellen.

## Résumé

### **Donnée du problème et buts du projet**

Le train de recherches AGB1 a pour but de mettre à la disposition des services des routes des méthodes leur permettant d'investir les moyens financiers limités de manière ciblée afin d'atteindre un niveau de sécurité adéquat sur l'ensemble du réseau.

S'agissant des ouvrages d'art, il faut pour ce faire des méthodes pour évaluer et comparer le risque lié à des objets, isolés ou en groupe, ainsi que des mesures pour réduire ce risque. Vu le grand nombre et la diversité de ces ouvrages, tout comme la variété des atteintes possibles, le développement d'une méthodologie constitue un défi de taille.

Les approches axées sur le risque – où les risques d'un ou de plusieurs objets sont estimés explicitement – n'ont jusqu'ici guère été utilisées pour les ouvrages d'art. Les contrôles de sécurité de ces derniers reposent actuellement sur diverses méthodes d'évaluation, des hypothèses pour l'effet des charges et les résistances et une prise en compte hétérogène des incertitudes. La garantie de la sécurité eu égard aux sollicitations résultant des charges est apportée sous forme de vérifications, dont il ne ressort pas le risque en cas de défaillance du système porteur.

La méthodologie d'appréciation du risque devant être mise au point dans le projet partiel 108 pour les ouvrages d'art doit s'inspirer de celle qui a été développée dans le projet partiel 102 pour l'évaluation comparative du risque relatif à l'ensemble du réseau routier. Elle doit permettre de traiter aussi bien des parcs entiers d'ouvrages que d'étudier un ouvrage en particulier. Les exigences qui se posent pour l'application respectivement à des parcs et à des ouvrages isolés sont énumérées ci-dessous.

Pour l'application à des parcs d'ouvrages:

- Aperçu et comparaison du risque pour divers types d'ouvrages d'art, d'atteintes ou de régions.
- Comparaison et fixation de priorités pour le risque au sein de catégories choisies d'ouvrages d'art, d'atteintes, de parties du système porteur et d'autres paramètres définis.
- Détermination de points faibles spécifiques de types ouvrages d'art (risques principaux pour un type d'ouvrages)
- Optimisation de mesures assurant une réduction efficace du risque sur l'ensemble du réseau et fixation d'un ordre de priorité (possibilité d'évaluer des mesures générales)
- Détermination de l'importance du risque pour les ouvrages d'art par rapport à d'autres risques (rendre possible les comparaisons)

Pour l'application à des ouvrages isolés:

- Estimation du risque pour l'objet précis découlant d'atteintes, de parties du système porteur, etc., globalement ou en particulier
- Evaluation des mesures et comparaison de diverses options pour l'objet considéré
- Définition de mesures prioritaires et classement des objets isolés figurant dans un inventaire limité
- Evaluation du degré d'acceptation du risque pour l'objet en particulier

### La notion de risque des ouvrages d'art

Dans le présent projet partiel, le risque  $R$  des objets d'art est calculé selon la formule suivante, par analogie au projet partiel 102:

$$R_j = \sum (h_j \cdot p_{fj} \cdot C_j)$$

où  $h_j$  = fréquence des événements,  $p_{fj}$  = probabilité d'une défaillance si un événement se produit,  $C_j$  = conséquences et  $j$  = indice des scénarios d'événements. Le symbole « somme » exprime le risque pour toutes les atteintes considérées ou toutes les combinaisons d'atteintes et leurs conséquences.

### Procédure d'estimation du risque

La méthodologie d'appréciation du risque pour les ouvrages d'art procède par étapes pour l'estimation du risque. Cette démarche permet d'adapter et de limiter le degré de détail en fonction de la question. Les étapes sont : « sélection », « analyse sommaire » et « analyse détaillée ». L'estimation du risque produit comme résultat les conséquences attendues, exprimées en décès immédiats, blessés, CHF, etc. par année.

### Sélection

La sélection a pour but de repérer les ouvrages exposés à des risques dans le parc d'un réseau routier. Les critères de sélection sont définis sur la base de l'expérience des spécialistes. Le résultat prend la forme de groupes d'ouvrages d'art à examiner plus en détail.

### Analyse sommaire

L'analyse sommaire porte sur un parc d'ouvrages d'art retenus par une sélection. Elle fournit un aperçu des risques encourus par ces objets et permet une évaluation succincte des mesures.

L'estimation du risque englobe la détermination de la fréquence des événements  $h_j$ , de la probabilité d'une défaillance si un événement se produit  $p_{fj}$  et des conséquences  $C_j$ . La probabilité d'une défaillance d'un ouvrage d'art ou de systèmes porteurs déterminants est estimée selon une approche probabiliste, où la résistance de l'ouvrage ou d'une partie porteuse est confrontée aux atteintes.

L'analyse sommaire autorise une marge pour ce qui est du degré de détail indiqué et de la charge de travail correspondante. Il est en particulier possible d'approfondir plus ou moins les examens visant à déterminer la probabilité d'une défaillance et l'inclusion de dépendances en rapport avec les conséquences et les mécanismes de défaillance.

Si les résultats de l'appréciation du risque ne sont pas assez clairs, une analyse détaillée s'imposera. C'est le cas

- s'il faut des indications précises sur le degré d'acceptation du risque,
- si l'analyse sommaire fait ressortir un risque élevé ou
- s'il faut procéder à une planification des mesures précise et spécifique pour l'objet (surtout en rapport avec l'acceptation du risque).

### Analyse détaillée

L'analyse détaillée consiste à estimer précisément le risque pour un objet donné. Ce dernier est estimé en tenant compte de toutes les particularités de l'ouvrage, en différenciant entre les atteintes et les propriétés de l'ouvrage. Vu le grand degré de détail d'une telle analyse, elle requiert une charge de travail considérable. L'analyse détaillée n'est pas traitée de manière plus approfondie dans le présent document.

### **Evaluation du risque**

L'évaluation du risque consiste à exprimer de manière uniforme, en CHF, le risque déterminé dans le cadre de l'estimation, et de l'évaluer selon des critères fixes (optimisation et acceptation). Pour les ouvrages d'art, elle obéit à la méthodologie de l'appréciation comparative du risque définie dans le projet partiel 102. Pour l'évaluation du risque d'ouvrages d'art, la méthodologie du projet partiel 108 distingue entre l'approche socio-économique et le point de vue de la gestion d'entreprise.

Les conséquences indirectes d'une défaillance d'un ouvrage d'art et de la fermeture d'un tronçon (risque du réseau) ne sont pas prises en compte dans cette méthodologie d'appréciation du risque pour les ouvrages d'art.

### **Conclusions**

Le projet relève clairement le dilemme entre l'analyse détaillée et exacte pour un ouvrage isolé et l'application à des parcs entiers. Même si la méthodologie est appropriée pour les deux cas de figure, elle n'en est pas moins confrontée à des limites en ce qui concerne la qualité des résultats pour l'ouvrage particulier ou la charge de travail pour de grands parcs d'ouvrages.

Dans la présente description de la méthodologie, l'accent est mis sur le niveau de l'analyse sommaire, où le but essentiel est de mettre à disposition des résultats sur les risques avec la plus grande efficacité possible. L'analyse détaillée, elle, peut s'appuyer sur des approches déjà établies de la modélisation et du calcul probabilistes.

La méthodologie mise au point dans le projet partiel 108 autorise une grande marge de manœuvre s'agissant du degré de détail de l'analyse et donc de la charge de travail requise. Cette souplesse est indispensable pour permettre d'apporter une réponse adéquate à la question posée (information suffisante obtenue avec un coût raisonnable). S'il faut se prononcer sur le risque pour des parcs entiers, l'appréciation peut être simplifiée. En revanche, s'il faut analyser les risques en détail et évaluer des mesures pour un ouvrage spécifique, il peut être indiqué d'approfondir davantage et donc de ne pas travailler avec autant d'hypothèses (simplifications). Il n'est par conséquent pas judicieux de définir la méthodologie d'appréciation du risque pour les ouvrages d'art de manière trop restrictive.

### **Application de la méthodologie**

Plus une méthodologie est large, pour permettre de répondre à une multitude de questions, moins ses résultats sont reproductibles (reproductibles dans le sens que différents utilisateurs parviennent aux mêmes résultats). Pour augmenter la reproductibilité, il faut limiter rigoureusement les questions et standardiser les méthodes. Ces restrictions doivent être définies avant une application à large échelle de la méthodologie du projet partiel 108.

Le large éventail d'ouvrages d'art et la grande variété de questions posées exigent – comme indiqué plus haut – une méthodologie laissant une certaine marge de manœuvre. Gérer celle-ci n'est pas facile et requiert des connaissances fondées sur l'appréciation des risques selon la méthodologie du projet partiel 102. En outre, il faut connaître la modélisation probabiliste des atteintes et des systèmes porteurs. Ces deux exigences limitent considérablement le cercle des utilisateurs.

Il est important d'effectuer les activités de recherche supplémentaires requises pour appliquer la méthodologie du présent projet partiel et de recueillir les expériences qui résultent des applications.

### **Recherches nécessaires**

Il semble judicieux de dresser systématiquement une liste des critères de sélection retenus, dans le cadre d'un processus d'appréciation qualitative soumis à un panel d'experts chevronnés:

- identification de points faibles dans les ouvrages d'art qui sont déterminants pour le risque
- définition d'atteintes déterminantes pour le risque.

La limitation de la charge de travail, la simplification de l'application et la nécessité d'obtenir des résultats reproductibles sont autant d'exigences qui appellent des simplifications, des hypothèses et une standardisation de certains domaines de la méthodologie du projet partiel 108.

Pour permettre néanmoins des assertions différenciées, il faut, en partant de la sélection décrite, développer des méthodes d'estimation du risque pour les principales questions (strictement limitées). Pour les galeries de protection contre la chute de pierres, les thèmes pourraient être restreints à « chute de pierres sur la galerie » et « heurt d'un pilier ».

La mise au point de méthodes axées sur les utilisateurs est très complexe et ne permet néanmoins pas de couvrir toutes les questions. Il est dès lors indiqué de procéder pas à pas et d'appliquer d'abord la méthodologie existante, de recueillir les expériences et de vérifier les résultats.

Dans les cas étudiés jusqu'ici, des hypothèses ont été formulées pour de nombreux paramètres de l'estimation du risque. Il apparaît judicieux de réunir systématiquement les hypothèses sur lesquelles sont fondées les diverses appréciations du risque.

## Summary

### Problem definition and aims

The AGB1 research package provides road authorities with methods enabling them to make best use of limited funds for investing in safety, in order to achieve an appropriate level of safety throughout the entire road network.

In the area of structures, this requires methods with which risks associated with individual objects and groups of objects can be assessed and compared with each other and measures for reducing risks can be assessed. The large number and diversity of structures and possible influences present special challenges in respect of such methodology.

Risk-based approaches, with which the specific risks of one of more objects are determined, have hardly ever been used in the field of structures to date. The safety check performed on structures is currently based on different assessment methods, assumptions regarding load effects and resistance and an inconsistent approach to dealing with uncertainties. To guarantee safety against load effects, evidence of safety is provided from which no failure risks concerning the supporting framework arise.

The risk assessment methodology for structures, which is to be developed in sub-project 108, should build on the methodology regarding the uniform risk assessment of the entire road network, which was developed in sub-project 102. The methodology should both make it possible to deal with entire populations of structures and to observe individual objects. Significant requirements regarding its application to populations and individual objects are listed below.

When applied to populations:

- Enable an overview and comparison of risks associated with selected structure types, influences or regions.
- Compare and prioritise risks within selected structure types, influences, supporting framework components and other defined parameters).
- Identify specific weaknesses of structure types (main risks within a particular structure type)
- Set priorities for and optimise effective network-wide measures for reducing risks in the whole network (being able to assess general measures)
- Determine the priority of risks associated with structures compared to other risks (make it possible to compare risks )

When applied to individual objects:

- Analyse risks associated with the individual object for all or selected influences, supporting framework components, etc.
- Assess measures and compare different measures with respect to an individual object
- Prioritise measures and rank individual objects within limited object inventories
- Assess the acceptance of risks associated with the individual object

### Definition of the risks associated with structures

As part of the sub-project at hand, the risk  $R$  associated with structures as outlined in sub-project 102 is calculated in general form as set out below:

$$R_j = \sum (h_j \cdot p_{fj} \cdot C_j)$$

with the event rate  $h_j$ , the probability of failure  $p_{fj}$  if an event occurs, the consequences  $C_j$  and the index of event scenarios  $j$ . The summation sign stands for the risks associated with all influences, combinations of influences and consequences considered.

### **Risk analysis procedure**

The risk assessment methodology for structures contains a step-by-step procedure for analysing risks. The aim of this procedure is to tailor and limit the level of analysis to the issue in question. The procedure is made up of the elements 'Selection', 'Rough Analysis' and 'Detailed Analysis'. The result of the risk analysis is expected consequences, expressed in terms of deaths, injured people, Swiss Francs, etc. per year.

### **Selection**

During the selection process, the objects associated with risks can be filtered out of the population of a road network. The selection criteria required for this purpose are determined by experts based on their own experience. The selection results in the formation of groups of structures which need to be thoroughly examined.

### **Rough analysis**

The rough analysis refers to a population of structures which has been limited by means of a selection process. The rough analysis provides an overview of the risks associated with this particular population. It is also possible to make a rough assessment of the measures that need to be taken.

Analysing the risk involves determining the event rate  $h_j$ , the probability of failure  $p_{fj}$  if an event occurs and the consequences  $C_j$ . Determining the probability of failure of a structure and relevant supporting framework components is done with the help of a probabilistic approach, which compares the resistance of a structure or supporting framework component with the influences.

The rough analysis allows for some leeway in terms of the level of detail and costs which are incurred during the analysis. In particular, leeway regarding the extend of the analysis is granted when it comes to determining the probability of failure and taking into account the dependencies in respect of consequences and failure mechanisms.

If the results of the risk assessment are not sufficiently meaningful, a detailed analysis must be conducted. This is the case if

- precise statements on acceptance of risks are required,
- great risks are identified in the rough analysis or
- a precise, object-specific action plan (particularly in the context of accepting risks) must be drawn up.

### **Detailed analysis**

In the detailed analysis, a comprehensive risk analysis is conducted on the individual object. The risks are assessed in discriminating fashion taking into consideration detailed, object-specific properties in relation to influences and the structure itself. The level of detail used for such a risk assessment leads to correspondingly great costs being incurred for the risk analysis. The detailed analysis is not dealt with in any more detail in the present study.

### **Risk assessment**

In the risk assessment, the risks identified during the risk analysis are consistently expressed in Swiss Francs and assessed on the basis of the given criteria (optimisation and acceptance). The risk assessment for structures follows the methodology on uniform risk assessment of sub-project 102. The methodology of sub-project 108 differentiates between a commercial and an economic point of view on assessing risks associated with structures.

Indirect consequences resulting from the failure of a structure and a corresponding route failure (network risks) are not determined as part of the methodology for assessing risks associated with structures.

## Conclusions

The project clearly shows the area of contention between exact, detailed analysis of an individual object and application in big populations. Even if the methodology can generally be used for both issues, limits are evident both in terms of the quality of statements on the individual object and regarding cost handling in a big population.

The description of the methodology at hand focuses on the level of the rough analysis. At this level, the biggest requirement is to obtain risk results in an efficient manner. The level of the detailed analysis can be based more on well-established approaches to probabilistic modelling and calculation.

The methodology developed for sub-project 108 allows great leeway in terms of the level of detail of the analysis and the associated analysis costs. This leeway is absolutely essential in order to enable an adequate statement to be made depending on the issue at hand (sufficiently meaningful with justifiable analysis costs). If risks associated with entire populations are to be presented, the risk assessment can be carried out in a simplified form. On the other hand, if a detailed analysis of the risks and assessment of measures are to be performed on an individual object, a greater level of detail with fewer simplifications and assumptions may be appropriate. It is therefore not sensible to define the methodology for assessing risks associated with structures in a way that is too restrictive.

## Application of the methodology

The more open the methodology, this in order to be able to address the various issues adequately, the less reproducible the results (reproducible in the sense that different users come to the same result). Severe restrictions in respect of issues and standardised methods are necessary if the reproducibility is to be increased. These must be made before the methodology of sub-project 108 is broadly applied.

The broad spectrum of structures and the number of different issues require – as stated above – a methodology that has some leeway. Dealing with it is challenging and presupposes in-depth knowledge of issues relating to risk assessment based on the methodology of sub-project 102. It also requires expertise in the area of probabilistic modelling of influences and supporting framework systems. Together they greatly restrict the group of users.

It is important to carry out the additional research activities necessary for implementing the methodology of the sub-project at hand and to gain experience by applying the methodology.

## Need for further research

It is appropriate that a committee of experienced experts provides a systematic overview of the selection criteria within the framework of a qualitative assessment process:

- Identification of risk-related weaknesses in structures
- Determination of risk-related influences

Limiting the costs, simplifying the application and the requirement to make results reproducible require simplifications, assumptions and standardisations of individual areas of the methodology of sub-project 108.

In order to enable discriminating statements to be made in spite of this, it is necessary to develop risk analysis methods for decisive and severely restricted issues, this on the basis of the selection process described. Taking a rockfall protector as an example, this could include the following restricted topics: 'rockfall on gallery', 'vehicle impact on pier'.

As the development of appropriate user-related methods is time-consuming and yet not all issues can be addressed with it, it is sensible to proceed gradually and first apply the existing methodology, gain experience and verify it.

In previous case studies, assumptions were made about numerous parameters of risk analysis. It is appropriate to systematically group assumptions which are made in various risk assessments.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Mit dem Forschungspaket AGB1 werden den Strassenverwaltungen Methoden zur Verfügung gestellt, die es ihnen ermöglichen, begrenzte finanzielle Mittel für Investitionen in die Sicherheit zielgerichtet einzusetzen, um ein angemessenes Sicherheitsniveau über das gesamte Verkehrssystem Strasse zu erreichen.

Im Bereich der Kunstbauten erfordert dies Methoden, mit denen Risiken von Einzelobjekten und Objektgruppen beurteilt und miteinander verglichen sowie Massnahmen zur Risikoreduzierung beurteilt werden können. Die grosse Anzahl und die Diversität der Kunstbauten und möglichen Einwirkungen stellen besondere Herausforderungen an eine solche Methodik dar.

Risikoorientierte Ansätze, mit denen explizit Risiken eines oder mehrerer Objekte ermittelt werden, haben im Bereich der Kunstbauten bisher kaum Anwendung gefunden. Die Sicherheitsprüfung von Kunstbauten beruht heute auf unterschiedlichen Beurteilungsmethoden, Annahmen für Lasteinwirkungen und Widerständen sowie einem unterschiedlichen Umgang mit Unsicherheiten. Für die Gewährleistung der Sicherheit gegen Lasteinwirkungen werden Sicherheitsnachweise erbracht, aus denen das Risiko eines Tragwerkversagens nicht hervorgeht.

Die im Teilprojekt 102 entwickelte Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung über das gesamte Verkehrssystem Strasse bildet gemäss Pflichtenheft [AGB 2006a] eine Grundlage für das vorliegende Teilprojekt 108, dessen Methodik darauf aufbauen soll.

## 1.2 Zielsetzung für das Projekt

In [AGB 2006a] lautet die Zielsetzung für das Teilprojekts 108:

*Konkretisierung und Validierung der Methode zur vergleichenden Risikobeurteilung für das Verkehrssystem Strasse im Teilsystem Kunstbauten.*

Weiterhin heisst es in [AGB 2006a]: „Die Kunstbauten bilden ein Teilsystem des Verkehrssystems Strasse. In dieser Forschungsarbeit sollen die Voraussetzungen geschaffen werden, dass die Risiken dieses Teilsystems mit Risiken in anderen Bereichen verglichen werden können. Zudem sollen auch Risiken aus unterschiedlichen Gefährdungen innerhalb des Teilsystems Kunstbauten untereinander vergleichbar sein.“

In der heutigen Praxis gelten Tragwerke als sicher, wenn ihre Tragsicherheit gemäss den Anforderungen der Normen und Vorschriften nachgewiesen werden kann. Es bestehen jedoch keine Angaben zu den mit einem Tragwerksversagen verbundenen Risiken.

Die Anwendung der im Teilprojekt 102 erarbeiteten Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung auf Kunstbauten soll Auskunft über die verschiedenen Risiken der Kunstbauten geben können. Die im Teilprojekt 102 erarbeitete Methodik soll überprüft und die Basis für die Risikobeurteilung der Kunstbauten im Gesamtsystem gefestigt werden.

Für das Teilprojekt 108 gelten die folgenden generellen Zielsetzungen:

- Erfassen und Strukturieren der relevanten Kunstbautentypen des Verkehrssystems Strasse.
- Erkennen von Nahtstellen zu den bestehenden Regelwerken und Prozessen.
- Aufzeigen, ob im Sinne der im Teilprojekt 102 erarbeiteten Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung von den charakteristischen Eigenheiten der Kunstbauten möglichst direkt auf Risikokennzahlen geschlossen werden kann.
- Ermöglichen von Aussagen zum Gesamtrisiko von Kunstbauten sowohl auf Netzebene als auch auf Objektebene.
- Nachweisen der Anwendbarkeit und Tauglichkeit der im Teilprojekt 108 erarbeiteten

Methodik zur Risikobeurteilung für Kunstbauten anhand ausgewählter Fallbeispiele. Hierbei stehen die Objekte des Projekts „Testregion“ im Vordergrund.

### **1.3 Vorgehen im Projekt**

Im Rahmen einer Voranalyse wurden Kunstbautentypen und Einwirkungen behandelt, welche durch die im Teilprojekt 108 zu entwickelnde Methodik zu erfassen sind. Zudem wurden Nahtstellen zu bestehenden Regelwerken und Prozessen identifiziert und untersucht, um Parameter und Einflussgrößen zu ermitteln, die zur Bestimmung von Risikokennzahlen, wie Ereignisraten und Konsequenzen, genutzt werden könnten. Die Ergebnisse der Voranalyse sind in Kapitel 3 zusammengefasst.

Hauptbestandteil des Projekts war die anschliessende Entwicklung der Methodik zur Risikobeurteilung für Kunstbauten. Diese erfolgte in mehreren Iterationsschritten, da im Spannungsfeld eines hohen geforderten Detaillierungsgrades der Methodik und einem gleichzeitig geforderten moderaten Aufwand zur Beurteilung der Risiken eine verträgliche Lösung zu finden war. Die Methodik wird in den Kapiteln 5 und 6 beschrieben.

Die entwickelte Methodik wurde am Beispiel zweier Einzelobjekte überprüft. Die Anwendung der Methodik an den Fallbeispielen gibt Hinweise zur späteren Umsetzung für das Gesamtnetz. Die Anwendung der Methodik ist in Kapitel 7 dargestellt.

Der Schlussbericht enthält zusammenfassend alle Erkenntnisse des Forschungsprojektes.

## 2 Fragestellung

### 2.1 Mögliche Fragestellungen

Das Rahmenziel für das Forschungspaket AGB 1 „Die Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten“ (siehe [AGB 2009]) lautet:

*Bereitstellen von Entscheidungsgrundlagen und Methoden für den zielgerichteten und zweckmässigen Einsatz begrenzter finanzieller Mittel zur Erreichung und Erhaltung des erforderlichen Sicherheitsstandards über das gesamte Verkehrssystem Strasse.*

Die Erfassung der Risiken der Kunstbauten im Zuständigkeitsbereich der Strassenverwaltungen ist notwendig, um die Risiken vergleichen und steuern zu können und somit die Grundlage für eine optimale Verteilung der verfügbaren Ressourcen zur Minimierung der Risiken zu schaffen. Die Ermittlung einer Risikoverteilung im Strassennetz kann auf zwei Arten erfolgen:

- Risikoermittlung für sämtliche Kunstbauten der Gesamtpopulation (Summieren der Risiken aller Einzelobjekte)
- Typisierung der Objekte und Risikoermittlung für Repräsentanten des definierten Typs; Hochrechnung auf das Gesamtinventar

Die erforderliche Ermittlung des Risikos eines Inventars von Kunstbauten kann, wie im Folgenden dargestellt, in mehreren Stufen erfolgen, welche eine unterschiedliche Detaillierung aufweisen und somit einen unterschiedlich hohen Aufwand erfordern. Mit Hilfe eines stufenweisen Vorgehens, bei dem auf risikorelevante Objekte und Fragestellungen fokussiert wird, wird der Analyseaufwand für grosse Systeme eingegrenzt.

#### **Vorstufe / Selektion**

Mit Hilfe eines Parametersets, das aufgrund der jeweiligen Fragestellung festzulegen ist, werden risikorelevante Kunstbauten ermittelt (Selektion). Ziel ist es, eine grosse Population von Objekten möglichst stark einzugrenzen auf die interessierende Fragestellung. Die Risiken der selektierten Objekte lassen sich in einem nachfolgenden Schritt mit Hilfe einer groben oder detaillierten Risikoermittlung genauer bestimmen.

Beispiele für Selektionen:

- Selektion von Kunstbautentypen (Brücken, Galerien, Tunnel, Stützbauwerke, ...) oder weiter eingegrenzt auf Tragwerksteile, die weiter zu untersuchen sind.
- Selektion von einzelnen Einwirkungen, allenfalls in Kombination mit definierten Kunstbautentypen und Tragwerksteilen.
- Selektion spezifischer Parameter wie beispielsweise Materialien, Topologie, Art der Nutzung, ...).

#### **Grobe Risikoermittlung**

Die Risiken der in der Selektion ermittelten risikorelevanten Einzelobjekte werden in vereinfachter Form ermittelt (= grobe Risikoermittlung). Ziel ist es, für Einzelobjekte oder Populationen eine Aussage zum Risiko oder zur Zweckmässigkeit von Massnahmen zu erhalten.

Beispiele für Fragestellungen für eine grobe Risikoermittlung:

- Wie hoch sind die (vereinfacht ermittelten) Risiken einzelner Objekte, die mit einer Selektion bestimmt wurden? Ziel ist beispielsweise ein Vergleich dieser Risiken mit anderen Risiken des Verkehrssystem Strasse.
- Wie hoch sind die (vereinfacht ermittelten) Risiken der selektierten Einwirkungen?
- Generelle Massnahmenbeurteilung: Wie viel tragen ausgewählte Massnahmen zur Risikoreduktion einzelner Objekte oder Populationen bei?

#### **Detaillierte Risikoermittlung**

Ist die grobe Ermittlung des Risikos für einzelne Objekte nicht ausreichend (z.B. für grosse, bedeutende Objekte) oder das ermittelte Risiko hoch, ist eine detaillierte Risikoermittlung angezeigt. Im Rahmen einer detaillierten Risikoermittlung werden die Risiken von Einzelobjekten unter Berücksichtigung objektspezifischer Eigenheiten auf Einwirkungs- und Widerstandsseite differenziert ermittelt. Mittels umfassender Risikoanalysen wird die Tragfähigkeit der Kunstbauten überprüft. Auf Grundlage dieser Daten lassen sich Kosten und Nutzen möglicher Sicherheitsmassnahmen differenziert ermitteln.

Beispiele für Fragestellungen für eine detaillierte Risikoermittlung:

- Wie hoch sind die exakt ermittelten Risiken einzelner Objekte? Wie gross sind die Risikoanteile der betrachteten Einwirkungen oder Kombinationen von Einwirkungen? Welche Versagensmechanismen bestimmen die Höhe des Risikos?
- Sind aus betriebswirtschaftlicher oder gesellschaftlicher Betrachtungsweise zusätzliche Massnahmen für ein einzelnes Objekt sinnvoll? Welches ist die optimale Massnahme bzw. Massnahmenkombination(Optimierung)?
- Sind aus Gründen der Akzeptanz der Risiken zusätzliche Massnahmen zwingend erforderlich (Risikoakzeptanz)? Welche Massnahmen sind dies?

Sowohl bei Fragen der Optimierung als auch bei der Akzeptanz von Risiken, geht es nicht nur um die Prüfung von zusätzlichen Massnahmen. Oft stellt sich ebenso die Frage, ob allenfalls auf bestehende Massnahmen verzichtet werden kann.

## **2.2 Ziele und Anforderungen an die Methodik**

Die im Teilprojekt 108 zu erarbeitende Methodik der Risikobeurteilung von Kunstbauten soll sowohl die Behandlung ganzer Populationen von Kunstbauten als auch die Betrachtung von Einzelobjekten ermöglichen. Einige wesentliche Anforderungen zur Anwendung auf Populationen bzw. auf Einzelobjekte sind im Folgenden aufgeführt.

Anwendung auf Populationen:

- Übersicht und Vergleich der Risiken ausgewählter Kunstbautentypen, Einwirkungen oder Regionen ermöglichen.
- Vergleich und Priorisierung der Risiken innerhalb ausgewählter Kunstbautentypen (Einwirkungen, Tragwerksteile, andere definierte Parameter).
- Ermittlung spezifischer Schwachstellen von Kunstbautentypen (Risikoschwerpunkte innerhalb eines Kunstbautentyps)
- Priorisierung und Optimierung netzweit wirkender Massnahmen zur Reduktion der Risiken im Gesamtnetz (generelle Massnahmen beurteilen können)
- Ermittlung des Stellenwerts der Risiken der Kunstbauten gegenüber anderen Risiken (Risikovergleich ermöglichen)

Anwendung auf Einzelobjekte:

- Risikoermittlung am Einzelobjekt für alle oder ausgewählte Einwirkungen, Tragwerksteile, etc.
- Massnahmenbeurteilung und Vergleich von Massnahmenvarianten bei einem Einzelobjekt
- Massnahmenpriorisierung und Rangierungen von Einzelobjekten innerhalb beschränkter Objektinventare
- Beurteilung der Akzeptanz von Risiken am Einzelobjekt

Der Aufwand zur Umsetzung der Methodik soll so sein, dass eine Anwendung auf gesamte Strassennetze mit vertretbarem Aufwand möglich ist (grosse Populationen). Aus diesem Grund soll die zu entwickelnde Methodik ohne aufwändige Analysen und Berechnungen am Einzelobjekt auskommen, wie beispielsweise rechnerische Nachweise der Tragfähigkeit oder ein eingehendes Studium bestehender Bauwerksunterlagen zur Tragwerksbemessung.

Die eigentliche Herausforderung liegt somit in der Entwicklung einer Methodik, die mit vertretbarem Aufwand angewendet werden kann und innerhalb nützlicher Frist aussagekräftige Ergebnisse zu beiden Betrachtungen (Populationen und Einzelobjekte) liefern kann.

## 2.3 Bezug zu Teilprojekten 102 und 104

Im Teilprojekt 102 "Vergleichende Risikobeurteilung" [Faber 2009] wird der methodische Ansatz für eine Risikobeurteilung entwickelt und beschrieben.

Für Kunstbauten gelten grundsätzlich die gleichen Regeln zur Ermittlung von Risiken, wie sie im Teilprojekt 102 definiert sind. So sind zur Ermittlung der Gesamtrisiken von Kunstbauten ebenfalls die Schritte

- Systemdefinition
- Risikobeurteilung:
  - Risikoermittlung
  - Risikobewertung

zu durchlaufen.

Die Definition des Systems ist als Grundlage der Risikobeurteilung von zentraler Bedeutung, da sich Risiken auf gleiche Systemgrenzen beziehen müssen, um vergleichbar zu sein. Mit der Systemdefinition sind folgende Punkte festzulegen:

- zu berücksichtigende Kunstbautentypen
- zu berücksichtigende Einwirkungen
- zu berücksichtigende Konsequenzen (Art, Wirkungsraum und Indikatoren)

Auslegeordnungen zu Kunstbautentypen und Einwirkungen sind in den Ziffern 3.1 und 3.2 enthalten.

Bei der in [Faber 2009] erarbeiteten methodischen Basis steht der quantitative Risikobegriff als Funktion der Eintretenswahrscheinlichkeit von Ereignissen und deren Konsequenzen ( $R = f(v, C)$ ) im Zentrum. Das Risiko  $R_j$  eines betrachteten Systems bezüglich einer Messgrösse  $j$  für Konsequenzen  $C_j$  errechnet sich in allgemeiner Form wie folgt:

$$R_j = v_j \cdot C_j$$

mit  $v_i$  als der jährlichen Ereignisrate, die zu den Konsequenzen der Messgrösse  $j$  führt. Dieser Ansatz bildet die Grundlage für die Risikobeurteilung für Kunstbauten. Er wird wie folgt angepasst:

$$R_j = h_j \cdot p_{fj} \cdot C_j$$

wobei  $v_i$  in die beiden Anteile der auf ein Jahr bezogenen Ereignisrate  $h_j$  und der Versagenswahrscheinlichkeit im Eintretenfall eines Ereignisses  $p_{fj}$  zerlegt wird. Die Ereignisrate  $h_j$  entspricht der Anzahl der Ereignisse, die pro Jahr zu erwarten sind.

Die Parameter zur Ermittlung der Risiken, die Risikokennzahlen  $h_j$ ,  $p_{fj}$  und  $C_j$ , sind mit Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten werden bei der Ermittlung der Risikokennzahlen explizit berücksichtigt.

Die Risikobewertung umfasst die Entscheidungsfindung hinsichtlich des optimalen Mitteleinsatzes für Sicherheitsmassnahmen und die Beurteilung der Akzeptanz von Risiken. Der optimale Mitteleinsatz wird wie im Teilprojekt 102 in Form einer Zielfunktion  $Z(a)$  sicher gestellt:

$$Z(a) = B(a) - C_y(a) - R(a)$$

Die Zielfunktion  $Z(a)$  enthält den Erwartungswert der positiven Wirkung bzw. des Nutzens  $B(a)$ , den Erwartungswert der Massnahmenkosten  $C_y(a)$  und das Risiko in Form des Erwartungswertes der Schadenskosten  $R(a)$ , alle bezogen auf die Handlungsalternative  $a$ .

Die Akzeptanz von Risiken wird auf der Basis der Effizienz von Massnahmen (Kosten/Wirksamkeit) und dem Grenzkostenkriterium beurteilt.

Für die Bewertung und den Vergleich von Risiken werden als Konsequenzen Personen-, Sach- und Umweltschäden erfasst und gemäss [Faber 2009] in monetarisierter Form ausgedrückt. Somit können die unterschiedlichen Einheiten von Konsequenzen (Bauwerksschäden, Personenschäden) sinnvoll aggregiert werden.

Das Teilprojekt 102 gibt den Gesamtrahmen vor. Dieser umfasst unter anderem die Massnahmenbeurteilung als Element für die Risikobewertung. Zu diesem Zweck wird die Massnahmenbeurteilung auch im Teilprojekt 108 gestreift. Das Thema der Massnahmenbeurteilung wird jedoch zusätzlich im Teilprojekt 104 vertieft.

## 2.4 Abgrenzungen

Das Teilprojekt 108 konzentriert sich auf die Methodik der Risikoermittlung. Fragen der Massnahmeneffizienz oder der Risikobewertung werden, wie im Ziffer 2.3 ausgeführt, nicht detailliert betrachtet. Im Rahmen der Anwendung der Methodik an Fallbeispielen (siehe Kapitel 7) wird für die ausgewählten Kunstbauten in Grundzügen eine Beurteilung einzelner Massnahmen durchgeführt. Es geht dabei jedoch nicht um eine umfassende Prüfung der Effizienz von Massnahmen, wie dies in den Teilprojekten 104 bzw. 109 der Fall ist, sondern um ein exemplarisches Vorgehen zur Vervollständigung der Risikobeurteilung.

Im Teilprojekt 108 werden ausschliesslich bauliche Bestandteile der Kunstbauten behandelt. Installationen (z.B. der betriebs- und sicherheitstechnischen Ausrüstungen) werden nicht erfasst.

Im Teilprojekt 102 werden die Sicherheitsbereiche „Naturgefahren“, „Störfälle“, „Verkehrssicherheit“, „Tragsicherheit“ und „Arbeitssicherheit“ umfassend behandelt. Im Teilprojekt 108 werden aus diesen Sicherheitsbereichen nur Ereignisse betrachtet, welche die Tragfähigkeit oder die Gesamtstabilität eines Bauwerks bzw. eines Tragwerksteils beeinträchtigen können. Direkte Konsequenzen bei Verkehrsteilnehmern durch Naturgefahren, Störfälle oder Verkehrsunfälle bei Strassenbenützern werden nicht betrachtet.

Weitere Abgrenzungen finden sich im Kontext der entsprechenden Themen in den nachfolgenden Kapiteln.

## 3 Auslegeordnung

In den folgenden Ziffern werden die betrachtete Kunstbautentypen (Ziffer 3.1), Einwirkungen (Ziffer 3.2) und Konsequenzen (Ziffer 3.3) dargestellt, die mit Hilfe der zu entwickelnden Methodik erfasst werden können. Im Sinne einer Auslegeordnung wird die Vielfalt insbesondere der Kunstbautentypen und der Einwirkungen strukturiert aufgezeigt. Die zu einigen Kunstbautentypen bestehenden spezifischen Abgrenzungen hinsichtlich ihrer Berücksichtigung durch die Methodik der Risikobeurteilung werden aufgeführt.

### 3.1 Kunstbauten

#### 3.1.1 Übersicht

Die ASTRA-Richtlinien „Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen“ [ASTRA 2005a] und „Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen“ [ASTRA 2005b] fassen unter dem Begriff „Kunstbauten“ zusammen:

- Brücken (inkl. Über- und Unterführungen)
- Galerien
- Tagbautunnel
- Überdeckungen
- Durchlässe
- Stützbauwerke
- Schutzbauwerke
- Tunnel (bergmännisch erstellt)
- Lärmschutzbauwerke

Weitere Unterteilungen dieser Oberbegriffe werden in den Richtlinien nicht vorgenommen.

In der Kunstbauten-Datenbank des ASTRA, der KUBA-DB [ASTRA 2004], werden die Kunstbauten wie folgt strukturiert:

Brücke, Viadukt	Trägerbrücke	Brücke mit Einfeldträger Brücke mit Durchlaufträger Brücke mit Gerberträger
	Rahmen-, Bogenbrücke	Brücke mit Rahmentragwerk Brücke mit Sprengwerk Brücke mit Bogentragwerk Brücke mit versteiftem Stabbogen / Langer'scher Balken Gewölbekonstruktion
	Seilbrücke	Schrägseilbrücke Hängebrücke Spannbandbrücke
	Spezielle Brücke	Brücke auf Wanne Plattenbrücke
Galerie	Galerie mit Rahmentragwerk Galerie mit Gewölbekonstruktion	
Tagbautunnel	Tagbautunnel mit Rahmentragwerk Tagbautunnel mit Gewölbekonstruktion	
Durchlass	Durchlass mit offenem Querschnitt Durchlass mit geschlossenem Querschnitt	

Stützbauwerk	Felssicherung Hangsicherung Stützmauer Stützkonstruktion
Schutzbauwerk	Erosionsschutz Grundwasserwanne Lawinenverbauung Ablenkmauer Schutzbau gegen Steinschlag Schutznetze Schutzdach
Bergmännischer Tunnel	

*Tabelle 1: Gliederung Kunstbauten nach KUBA-DB*

Grundlegende bauliche Normen, Richtlinien, Dokumentationen und Verordnungen zu Kunstbauten sind:

- Richtlinie ASTRA „Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen“ [ASTRA 2005a]
- Richtlinie ASTRA „Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen“ [ASTRA 2005b]
- Richtlinie ASTRA „Berücksichtigung des Unterhalts bei der Projektierung und beim Bau der Nationalstrassen“ [ASTRA 2002]
- Norm [SIA 260] „Grundlagen der Projektierung von Tragwerken“
- Norm [SIA 262] „Betonbau“
- Norm [SIA 263] „Stahlbau“
- Norm [SIA 462] „Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke“
- Norm [SIA 469] „Erhaltung von Bauwerken“

In Anlehnung an die Strukturierung der Kunstbauten durch das ASTRA werden die diversen Kunstbautentypen in den folgenden Ziffern dargestellt: Brücken, Tunnel, Überdeckungen, Galerien, Stützbauwerke, Schutzbauwerke, Wannen, Lärmschutzbauwerke sowie Durchlässe, Düker und Werkleitungskulissen.

### **3.1.2 Brücken**

Neben den in Ziffer 3.1.1 aufgeführten Regelwerken stellen folgende Dokumentationen des ASTRA wichtige Grundlagen für Brücken dar:

- Dokumentation „Überprüfung bestehender Strassenbrücken mit aktualisierten Strassenlasten“ [ASTRA 2006]
- Dokumentation „Beurteilung der Erdbebensicherheit bestehender Strassenbrücken“ [ASTRA 2005c]
- Richtlinie „Anprall von Strassenfahrzeugen auf Bauwerksteile von Kunstbauten“ [ASTRA 2005d]

Zu Brücken bestehen diverse Unterscheidungskriterien. In Tabelle 2 werden Brücken nach einigen dieser Kriterien aufgeführt. Nicht alle Brückenarten kommen auf dem schweizerischen Nationalstrassennetz vor.

<b>Funktion</b>	<b>Topologische Lage</b>	<b>Konstruktion</b>
Strassenbrücken Eisenbahnbrücken Fussgänger- und Radwegbrücken Über- / Unterführungen Kanal-/Wasserbrücken (Aquädukte) Wildbrücken Rohr- oder Leitungsbrücken Signalbrücken Durchlässe  <b>Material</b> Massivbrücken: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Steinbrücken</li> <li>▪ Stahlbetonbrücken</li> <li>▪ Spannbetonbrücken</li> </ul> Metallbrücken: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gusseisenbrücken</li> <li>▪ Stahlbrücken</li> <li>▪ Stahlverbundbrücken</li> <li>▪ Aluminiumbrücken</li> </ul> Sonstige Materialien: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Holzbrücken</li> <li>▪ Faserverbundbrücken</li> </ul>	Talbrücken Stadtbrücken Hangbrücken / Lehnenviadukte Flussbrücken Bachbrücken Kanalbrücken Hochbrücken  <b>Bauverfahren</b> Abschnittsweise Herstellung auf Lehrgerüst in Ortbeton Betonfertigteile mit Ortbetonfugen Bogenklappverfahren Fertigteile mit Ortbetongängung Freivorbau Freivorbau mit Hilfsabspannung Kletterschalung Schreitschalung Längsverschub Taktschiebeverfahren Querverschub Segmentbauweise Verbund-Fertigteil-Träger (VFT-Träger) und Schalwagenherstellung Vorschubrüstung	Balkenbrücken: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plattenbrücken</li> <li>▪ Plattenbalkenbrücken</li> <li>▪ Hohlkastenbrücken</li> <li>▪ Rahmenbrücken</li> <li>▪ Vierendeelträgerbrücken</li> </ul> Fachwerkbrücken: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Parallelgurtige Fachwerke</li> <li>▪ Nicht parallelgurtige Fachwerke</li> <li>▪ Pfostenlose Fachwerke mit unten- bzw. oberliegender Fahrbahn</li> </ul> Sonstige Konstruktionen: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bogenbrücken</li> <li>▪ Hängebrücken</li> <li>▪ Schrägseilbrücken</li> <li>▪ Sprengwerkbrücken</li> <li>▪ Auslegerbrücken</li> <li>▪ Seilbrücken</li> <li>▪ Spannbandbrücken</li> <li>▪ Viadukte, Aquädukte</li> </ul>

Tabelle 2: *Gliederung Brücken*

Im Pflichtenheft zum Teilprojekt 108 wird deutlich gemacht, dass „das Versagen einer Brücke ein derart einschneidendes Ereignis darstellt, dass es von der Gesellschaft nicht akzeptiert wird, auch wenn keine Todesfälle zu beklagen sind.“ Vor diesem Hintergrund sind sämtliche Brücken des Verkehrssystems Strasse zu berücksichtigen. Unabhängig von ihrer Funktion (siehe Tabelle 2) sind sämtliche Brücken zu erfassen, welche über Strassen führen, da sie potentielle Gefährdungen darstellen.

### 3.1.3 Galerien

Galerien sind zum Schutz gegen Lawinen und Steinschlag errichtete Bauwerke. Meist werden sie mit einer offenen Seite als Halbtunnel ausgeführt. Sie werden in der Regel entweder in Ortbetonbauweise erstellt oder bestehen aus Stahlbeton-/Spannbeton-Fertigteilen. Da sie aufwändig in der Erstellung sind, stellen sie einen beträchtlichen Sachwert dar. Sie werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit berücksichtigt.

Die ASTRA-Richtlinien „Einwirkungen infolge Steinschlags auf Schutzgalerien“ [ASTRA 2008] und „Einwirkungen infolge Lawinen auf Schutzgalerien“ [ASTRA 2007a] wurden mit dem Ziel verfasst, die Normen [SIA 261] und [SIA 261/1] zu den Bereichen der Steinschlag- bzw. Lawineneinwirkungen zu ergänzen. Sie sind verbindlich für die Bestimmung der Einwirkungen aus solchen Ereignissen auf vom Bund mitfinanzierte Schutzgalerien der Strassen. Die Richtlinien gelten für die Planung und Erstellung von Neubauten. Bei der Massnahmenplanung im Rahmen der Erhaltung gelten die Grundsätze der Richtlinien sinngemäss.

### 3.1.4 Tunnel

Tunnel lassen sich wie in Tabelle 3 dargestellt strukturieren.

Funktion	Bauverfahren	Konstruktion
Strassentunnel	Tagbautunnel: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ offene Bauweise</li> <li>▪ Deckelbauweise</li> </ul> Bergmännische Erstellung: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT)</li> <li>▪ Sprengvortrieb</li> <li>▪ Tunnelbohrmaschine</li> <li>▪ Lunardi-Methode</li> </ul> Sonstige Methoden: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einschwimm- und Absenkverfahren</li> </ul>	Ortbeton Tübbings ein- oder zweischaliger Aufbau Rechteckprofil Hufeisenprofil Kreisprofil

Tabelle 3: Gliederung Tunnel

Wesentliche bauliche Bestandteile eines Tunnels sind Gewölbe / Tübbings, Innengewölbe, Parament / Tunnelwände, Bankett, Schächte (Kabel, Entwässerung, Hydranten, ...), Schlitzrinne, Randstein, Fahrbahnplatte und – belag, Werkleitungskanal, Querverbindungen, Portalbauwerke sowie weitere Nebengebäude, im Fall längerer Tunnel zudem Zuluft- und Abluftkanal, Lüftungszentralen, Zuluft- und Abluftbauwerke.

Die Norm [SIA 197] „Projektierung Tunnel – Grundlagen“ enthält die Grundlagen, die bei der Projektierung von Strassentunneln (und Bahntunneln) zu beachten sind. Sie umfasst unter Anderem diverse Aspekte der Sicherheit und der Umwelt sowie in Anlehnung an die Tragwerksnormen des SIA die Bestimmungen für die Projektierung eines im Untertagebau erstellten Tragwerkes. Die Norm [SIA 197/2] behandelt die Besonderheiten, die bei der Projektierung eines Strassentunnels zu berücksichtigen sind.

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit werden nur Strassentunnel bis zu einer Länge von rund 300 m berücksichtigt (in der Regel in Tagbauweise erstellt). Die Risikobeurteilung längerer Strassentunnel sollte einzelobjektweise in detaillierter Form erfolgen.

### 3.1.5 Überdeckungen

Überdeckungen sind Tunnels, die in einer offenen Bauweise erstellt werden und eine spezielle Funktion ausüben, z.B. Erhöhung der Wohnqualität der Anwohner durch Reduktion des Verkehrslärms, Schaffung von zusätzlichen Freiräumen für die Bevölkerung und Lebensräumen für Pflanzen und Tiere.

### 3.1.6 Durchlässe, Düker und Werkleitungskulissen

Die Bauwerke unterscheiden sich wie folgt:

- Durchlässe sind Bauwerke im Erdkörper einer Strasse, die den Durchtritt von Wasser ermöglichen. Kleinere Bäche, aber auch bei Niederschlägen anfallendes Abwasser, können eine Strasse passieren.
- Düker sind Kreuzungsbauwerke, mit denen Wasser- oder Abwasserleitungen als Unterquerungs-Druckleitungen unter Strasse hindurchgeführt werden. Sie bestehen in der Regel aus einer Einlauframpe, dem Druckrohr und der Auslauframpe.
- Werkleitungskulissen sind begehbare Bauwerke, in denen Werkleitungen unter Strassen durchgeführt werden.

### 3.1.7 Stützbauwerke

Stützbauwerke umfassen Stützmauern und –konstruktionen sowie Hang- und Felssicherungen. Stützmauern können ausgebildet werden in Form von Natursteinmauern, Gewichtsmauern, Winkelstützmauern oder Rucksackmauern (Winkelstützmauern mit zusätzlichen Kragplatten).

### 3.1.8 Schutzbauwerke

Die Bauwerke unterscheiden sich wie folgt:

- Sicherungen gegen Steinschlag, Felssturz umfassen Felsanker, Felsabdeckungen mit verankerten Drahtseilnetzen oder Spritzbeton und diverse Varianten von Steinschlagverbauungen. Diese Sicherungen stellen nur untergeordnete Bauten dar und werden daher bei der Erarbeitung der Methodik nicht berücksichtigt.
- Lawinerverbauungen werden in verschiedenen Formen ausgeführt:
  - Verwehungsverbau: Ein Verwehungsverbau beeinflusst die Ablagerung des Schnees, damit dieser nicht losbricht. Dazu dienen unter anderem Schneezaun, Kolktafeln und Düsendach.
  - Stützverbau: Ein Stützverbau hält den Schnee im Lawinengang fest. Bekannte Arten sind Stahl-Schneebrücke, Holz-Schneerechen und Schneenetze.
  - Umlenkverbau: Ein Umlenkverbau lenkt die Lawine vom gefährdeten Objekt weg. Bekannte Beispiele sind Lawingalerie, Leitkamm oder der Spaltkeil.
  - Bremsverbau: Ein Bremsverbau bringt die Lawine im Auslaufbereich rechtzeitig zum Stehen. Die Ausbildung erfolgt in Form von Bremshöckern oder Auffangdämmen.

Lawinerverbauungen stellen untergeordnete Bauten dar. Sie werden jedoch bei der Ermittlung des Widerstands von Einzelobjekten bzw. bei der Ermittlung der Eintretensraten berücksichtigt.

- Führen Strassen durch tiefe Geländeeinschnitte, kann es erforderlich sein, sie mittels einer Wanne gegen Erddruck und gegebenenfalls gegen Grundwasser zu schützen. Wannen bestehen aus Stahl- bzw. Spannbeton. Sie werden bei der Erarbeitung der Methodik berücksichtigt.

### 3.1.9 Lärmschutzbauwerke

Lärmschutzbauwerke sollen den von einer Strasse ausgehenden Verkehrslärm so weit abschwächen, dass an den zu schützenden Immissionsorten (z. B. Wohnbebauung, Krankenhäuser) die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten werden. Es lassen sich Lärmschutzwände, Überdeckungen sowie Erd- und Steilwälle unterscheiden.

Lärmschutzwände bestehen zumeist aus vorgefertigten Elementen. Dabei können unterschiedliche Materialien zum Einsatz kommen: Beton, Stahl, Mauerwerk, Holz, (faserverstärkter) Kunststoff, Glas. Lärmschutzwände werden ab einer gewissen Grösse (z.B. Fläche > 50 m<sup>2</sup> oder Höhe > 4 m) bei der Erarbeitung der Methodik berücksichtigt. Erd- und Steilwälle werden nicht berücksichtigt.

## 3.2 Einwirkungen

### 3.2.1 Übersicht

In der Voranalyse zum Forschungspaket AGB 1 [AGB 2006b] wurden bestehende Ansätze zur Risikobeurteilung und zur Gewährleistung einer ausreichenden Sicherheit in unterschiedlichen Sicherheitsbereichen des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten aufgearbeitet. Die vorhandenen Methoden wurden erfasst und detailliert in einer Matrix, aufgespannt durch Gefährdungen und gefährdete Objekte, im Überblick dargestellt (Übersicht über die Sicherheitsbereiche). Diese sogenannte „Risikomatrix“ liefert eine systematische Auflistung der Wechselwirkungen von Gefährdungen und Objekten.

Die folgende Tabelle erläutert den Bezug zwischen den Sicherheitsbereichen, wie sie in der Voranalyse AGB1 umschrieben sind, mit den für die Risikobeurteilung für Kunstbauten als relevant eingestuften Gefährdungsbereichen.

Sicherheitsbereiche Voranalyse AGB1	Gefährdungen Risikobeurteilung für Kunstbauten
Umwelt	Der Sicherheitsbereich wird nicht weiter verwendet. Es handelt sich um Einflussfaktoren, die eine Ursache bilden können, nicht aber um Ereignisse. Indirekt – im Sinne von Ursachen für Gefährdungen – sind die erfassten Gefährdungen in die Gefährdungsbereichen „ <i>Einwirkungen aus Strassenverkehr</i> “ und „ <i>Bauwerksimmanente Ursachen</i> “ enthalten.
Verkehrsunfälle	Strassenverkehrsunfälle im engeren Sinne werden nicht berücksichtigt. Die Einwirkungen von Verkehrsunfällen auf Kunstbauten werden im Gefährdungsbereich „ <i>Einwirkungen aus Strassenverkehr</i> “ behandelt.
Folgeeinflüsse	Die im Sicherheitsbereich „Folgeeinflüsse“ erfassten Risiken sind z.T. im Gefährdungsbereich „ <i>Einwirkungen aus Strassenverkehr</i> “ integriert.
Naturgefahren	Gefährdungsbereich „ <i>Einwirkungen aus Naturgefahren</i> “
Störfälle	Die im Sicherheitsbereich „Störfälle“ erfassten Risiken sind in den Gefährdungsbereichen „ <i>Einwirkungen aus Strassenverkehr</i> “ und „ <i>Sonstige Einwirkungen</i> “ integriert.
Lasteinwirkungen und sekundäre Einwirkungen	Die Einwirkungen dieses Sicherheitsbereichs werden den Gefährdungsbereichen „ <i>Ständige Einwirkungen</i> “, „ <i>Einwirkungen aus Strassenverkehr</i> “, „ <i>Einwirkungen aus Naturgefahren</i> “ und „ <i>Sonstige Einwirkungen</i> “ zugeordnet.
Betrieb und Unterhalt Strassen und Infrastruktur	Der Sicherheitsbereich wird dem Gefährdungsbereich „ <i>Bauwerksimmanente Ursachen</i> “ zugeordnet.
Verkehrsgeschehen	Es handelt sich um Ursachen oder um Einflussgrößen der Konsequenzen von Ereignissen (→ Gefährdungsbereich „ <i>Einwirkungen aus Strassenverkehr</i> “).
Umfeld	Der Sicherheitsbereich wird zum Teil dem Gefährdungsbereich „ <i>Bauwerksimmanente Ursachen</i> “ zugeordnet.
Sicherheitskosten	Der Sicherheitsbereich wird nicht weiter verwendet. Es handelt sich primär um Konsequenzen, die bei verschiedenen Sicherheitsbereichen anfallen können.
Beschaffenheit Infrastruktur	Es handelt sich primär um Ursachen, die zu einem Verkehrsunfall führen können (→ Gefährdungsbereich „ <i>Einwirkungen aus Strassenverkehr</i> “).

Tabelle 4: Gliederung der Gefährdungsbereiche

In den folgenden Ziffern werden die für das Verkehrssystem Strasse massgebenden Gefährdungsbereiche beschrieben.

### 3.2.2 Ständige Einwirkungen

Folgende Gefährdungen werden bei der Erarbeitung der Methodik berücksichtigt:

- Eigenlasten des Bauwerks
- Auflasten
- Ständige Lasten aus Baugrund (u.a. Erdauflast und Eigenlast des Bodens, Erddruck aus Eigenlast des Bodens, Erddruck aus ständigen äusseren Lasten oder Kräften)

Zu den Eigenlasten des Bauwerks, den Auflasten sowie den ständigen Lasten aus Baugrund sind in der Norm [SIA 261] Kennwerte in Form von Raum- und Flächenlasten sowie Erddruckbeiwerten angegeben.

### 3.2.3 Einwirkungen aus Naturgefahren

Folgende Ereignisse werden bei der Erarbeitung der Methodik berücksichtigt:

- Lawinen (Fliesslawinen, Staublawinen)
- Stein- und Blockschlag
- Felssturz
- Wildbäche (hohe Wasserführungen im Gerinne eines Bachlaufs und Murgänge)
- Rutschungen
- Hangmuren
- Bodenabsenkungen und –hebungen
- Hochwasser
- Erdbeben
- Wind
- Schnee

Angewandte Instrumente und Methoden zur Beurteilung der Risiken sind:

- (a) Quantitativer Ansatz zur Beurteilung von Naturgefahren basierend auf einem dreistufigen Vorgehen:
  - Risikoanalyse:  
Festlegen von Ereignisszenarien (Häufigkeit, Ausmass), Überlagerung mit Exposition gefährdeter Objekte und Bestimmung der Risiken (individuell, kollektiv, Sachschaden)
  - Risikobewertung:  
Mittels definierter Schutzziele für individuelle Risiken in Abhängigkeit der Freiwilligkeit; Bestimmung von Grenzkosten für die Beurteilung der Kostenwirksamkeit von Massnahmen; Risikoaversionsfunktion für Personenschäden.
  - Integrale Massnahmenplanung:  
Durch Kosten-Wirksamkeitsbeurteilungen von verschiedenen Massnahmen werden Umfang und Realisierungsprioritäten bestimmt (Beurteilung einzelner Massnahmen, Entwicklung und Optimierung von Massnahmenkombinationen).

Ereignisszenarien und Ereignishäufigkeiten können für die Ermittlung von Risiken von Kunstbauten übernommen werden.

- (b) Intensitätskarten:

Intensitätskarten können als Grundlage für die Risikoermittlung dienen. Intensitätskarten beinhalten Informationen über die Intensität und Eintretenswahrscheinlichkeit von Naturgefahren-Prozessen sowie deren räumliche Ausdehnung. Sie enthalten ausschliesslich Aussagen über das Gefahrenpotential.

Umfangreiche Grundlagen zu diversen Naturgefahren sind enthalten in [BRP 1997a], [BRP 1997a] und [BUWAL 1998].

Fazit zum Gefährdungsbereich "Naturgefahren":

Angaben zu Eintretensraten und Intensitäten von Ereignissen liegen höchstens in grober Klassierung vor (Intensitätskarten). Anhand dieser Angaben sind keine Aussagen zur Versagenswahrscheinlichkeit oder zum Schadensausmass von Bauwerken unmittelbar ableitbar. Die Angaben können lediglich als Ansatzpunkte für die Ermittlung der Risiken von Kunstbauten dienen. Die Einflussgrössen für die Entstehung von Ereignissen und für deren Kraftereinwirkung auf Bauwerke sind in der Regel bekannt.

### **3.2.4 Einwirkungen aus Strassenverkehr**

Folgende Ereignisse werden bei der Erarbeitung der Methodik berücksichtigt:

- Verkehrslasten (gemäss Lastmodell 1 [SIA 261] bzw. [ASTRA 2006])
- Ausnahmetransporte
- Fahrzeuganprall (nach [ASTRA 2005d])
- Fahrzeugbrand
- Explosion von Gefahrgut
- Freisetzung von Gefahrgut

Der Gefährdungsbereich „Strassenverkehr“ umfasst sämtliche Ereignisse, die von Verkehrsteilnehmern ausgehen und im Allgemeinen zu Personenschäden und/ oder zu Sachschäden (Fahrzeuge, Infrastruktur) führen. Ansätze und Methoden, die Elemente zur Durchführung von Risikoanalysen enthalten, sind auf verschiedenen Ebenen vorhanden:

- **Strassenverkehrszählungen:**  
Zählungen des Strassenverkehrs liefern relevante Grundlagen (DTV, Anteil Schwerlastverkehr) zur Abschätzung der Ereignisraten diverser Einwirkungen.
- **Achslastmessungen:**  
Die Auswertungen der Achslastmessungen des ASTRA geben wertvolle Hinweise zur Abschätzung der Höhe aktueller Einwirkungen.
- **Strassenverkehrsunfallstatistik:**  
Aufgrund der grossen Ereigniszahlen im Strassenverkehr kann für bestimmte Strassenabschnitte oft direkt die Anzahl Unfälle pro Jahr bzw. ein Risikowert bestimmt werden. Das umfangreiche statistische Material erlaubt es, für verschiedenste Ursachen, Ereignisse und Konsequenzen Risikokennzahlen abzuleiten.
- **Normen:**  
Diverse Normen befassen sich mit der Auswertung und Analyse von Einwirkungen (u.a. [VSS 640 320a]) und Verkehrsunfällen sowie deren Bewertung.
- **Sicherheitsstrategien und netzweite Handlungsprogramme auf der Basis von Kosten-Nutzen-Überlegungen, wie beispielsweise die Projekte VESIPO und via sicura des ASTRA**

Die Störfallsicherheit auf Strassen wird als Teilmenge der allgemeinen Strassenverkehrssicherheit verstanden. Das Vorgehen für die Gewährleistung der Störfallsicherheit ist in der Störfallverordnung [SR 814.012] mit Handbüchern, Leitfäden und Wegleitungen vergleichsweise detailliert gesetzlich verankert. Die Beurteilung der Störfallsicherheit basiert auf einem quantitativen, zweistufigen Ansatz, mit dem Risiken abgeschätzt werden:

- (a) Erste Stufe: Kurzbericht; Einschätzung der Häufigkeit einer schweren Schädigung (Personen und Umweltschäden) in Abhängigkeit der Ausgestaltung der Strasse, des Verkehrs und der Umgebung. Es handelt sich um ein Screening/Triage.
- (b) Zweite Stufe: Risikoermittlung; vertiefte quantitative Risikoanalyse und Darstellung von Szenarien als Summenkurve in einem Häufigkeits-Ausmass-Diagramm, Beurteilung anhand von Akzeptanzlinien. Diese enthalten eine starke Risikoaversion.

Bei der Beurteilung der Störfallsicherheit gemäss Störfallverordnung werden in erster Linie Personenschäden betrachtet, dagegen keine Aussagen zu Bauwerkschäden gemacht. Kennzahlen für Häufigkeiten von Einwirkungen können jedoch für die Ermittlung der Risiken von Kunstbauten verwendet werden.

Fazit zum Gefährdungsbereich „Strassenverkehr“:

Die Ereignisraten von Ereignissen sind in der Regel anhand statistischer Werte ableitbar. Angaben zur Intensität von Ereignissen sind vorhanden oder lassen sich anhand vorliegender Anhaltspunkte ableiten. Dagegen liegen keine Angaben zur Versagenswahrscheinlichkeit resp. zur Grösse des Schadensausmasses von Bauwerken im Ereignisfall vor. Die Einflussgrössen für das Eintreten von Ereignissen und für deren Kräfteinwirkung auf Bauwerke sind bekannt.

### 3.2.5 Sonstige Einwirkungen

Folgende Ereignisse werden bei der Erarbeitung der Methodik berücksichtigt:

- Sabotage, Vandalismus
- Terroranschlag
- Brand (z.B. Material unter einer Brücke)
- Explosion (Wirkung von innen oder aussen auf ein Bauwerk)

Fazit zum Gefährdungsbereich „Sonstige Einwirkungen“:

Es liegen praktisch keine Angaben zu Eintretensraten und zur Intensität von Ereignissen vor. Die wichtigsten Einflussgrössen für den Bauwerkswiderstand dagegen sind bekannt.

### 3.2.6 Bauwerksimmanente Ursachen

Die Tragsicherheit von Bauwerken beinhaltet die Gewährleistung einer ausreichenden Sicherheit gegen das Erreichen von Grenzzuständen der Tragfähigkeit. Die Gewährleistung der Tragsicherheit erfolgt primär durch Einhalten der in den Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) sowie der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS) festgehaltenen Vorschriften.

Die Beurteilung der Tragsicherheit basiert auf einem quantitativen Ansatz, welcher nur die Tragsicherheit als solches, Versagenswahrscheinlichkeit und Ausmass infolge eines Versagens jedoch nicht explizit betrachtet:

- (a) Ermittlung der Auswirkungen (Schnittkräfte) im Tragwerk
- (b) Ermittlung der erforderlichen Tragwiderstände auf Basis der kalkulierten Auswirkungen
- (c) Vergleich der erforderlichen und der vorhandenen Tragwiderstände

Neue Generationen von Tragwerksnormen (wie z.B. die in Erarbeitung befindliche Norm [SIA 269] mit den bauweisenspezifischen Normen SIA 269/1- 269/7) dagegen enthalten risikobasierte und entscheidungstheoretische Grundlagen. Zur Kalibrierung dieser Tragwerksnormen werden massgebliche Unsicherheiten und Konsequenzen des Versagens von Tragwerken explizit berücksichtigt (z.B. durch Anwendung des JCSS Probabilistic Model Codes [JCSS 2001]).

Die Tragfähigkeit bzw. der Widerstand eines Bauwerkes gegenüber Einwirkungen hängt in erster Linie von den bei der Dimensionierung zugrunde gelegten Modellannahmen für Lasten und Widerstand (welche zwischen den einzelnen Normengenerationen beträchtliche Unterschiede aufweisen können), allenfalls vorgenommenen Verstärkungs- oder Schutzmassnahmen sowie dem aktuellen Zustand des Bauwerkes bzw. relevanter Tragwerksteile ab. Allfällige Projektierungs- oder Ausführungsfehler können zu einer Tragfähigkeit eines Bauwerks führen, die den vorhandenen Anforderungen bei Weitem nicht genügt.

Der aktuelle Zustand eines Bauwerks ist das Resultat zahlreicher chemischer und physikalischer Prozesse (Bewehrungskorrosion, Karbonatisierung des Betons, Alkali-Aggregat-Reaktion, Abwitterung, physische Abnutzung, ...) sowie der ausgeführten Massnahmen im Rahmen des baulichen und betrieblichen Unterhalts. Die Erfassung dieser Einflussgrössen und sämtlicher gegenseitiger Abhängigkeiten würde ein äusserst komplexes Modell erfordern, so dass eine aggregierte Beurteilung der Grösse „Zustand“ zweckmässiger erscheint. Diese wird in Form der Zustandskategorien 1 („gut“) bis 5 („alarmierend“) erfasst. Der Widerstand eines Bauwerks gegenüber den Einwirkungen wird in der vorliegenden Arbeit als Zufallsvariable mit Mittelwert und Standardabweichung abgebildet (siehe Ziffer 5.4). Damit wird der Möglichkeit Rechnung getragen, dass sich ein Bauwerk in einem unerwartet schlechten Zustand befindet.

Fazit zum Gefährdungsbereich „Bauwerksimmanente Ursachen“:

Die klassische Beurteilung der Tragsicherheit anhand der Normen SIA und VSS liefert keine Angaben zum Risiko eines Bauwerkes.

Hauptinflussgrössen für den Widerstand eines Bauwerkes gegenüber Einwirkungen sind die Modellannahmen der Normen, nach denen ein Bauwerk bemessen wurde, allenfalls vorgenommene Verstärkungs- oder Schutzmassnahmen sowie der aktuelle Zustand des Bauwerkes bzw. der relevanten Tragwerksteile.

Die Auslegeordnung zu den Gefährdungsbereichen zeigt, dass die Ansätze zum Umgang mit Risiken sehr heterogen sind. Sie reichen von expliziten Risikobewertungen bis hin zur Anwendung von massnahmenorientierten Vorschriften und Normen, in denen keinerlei Risikoüberlegungen angestellt werden.

### 3.3 Konsequenzen

Bei der Risikobeurteilung für Kunstbauten werden ausschliesslich Konsequenzen berücksichtigt, die unmittelbar das Bauwerk oder Personen, die durch ein Bauwerksversagen geschädigt werden, betreffen. Indirekte Konsequenzen in Form von Auswirkungen auf das umgebende Strassennetz aufgrund einer Umlagerung des Verkehrs werden nicht erfasst (Zeitverluste, Betriebsaufwand, zusätzliche Verkehrsunfälle). Diese werden im Rahmen des Teilprojekts 103 [Ferraud 2009] behandelt.

Zu den unmittelbaren Konsequenzen werden die Schäden am Bauwerk selbst sowie unmittelbare Folgen einer Schädigung bzw. eines Bauwerkversagens gezählt. Dazu gehören:

- Personenschäden bei Verkehrsteilnehmern und Dritten: Verletzte und Todesopfer
- Sachschäden:
  - Aufwand für die Wiederherstellung eines Einzelobjekts (Im konkreten Schadensfall erfolgt oft eine Wiederherstellung, die über den reinen Funktionserhalt hinausgeht, wie Erneuerungen oder Anpassungen an den aktuellen Stand der Technik. Diese Aufwendungen dürfen nicht dem Ereignis als Konsequenzen zugeordnet werden.)
  - Sachschäden bei Verkehrsteilnehmern
  - Sachschäden bei Dritten (z.B. Gebäude unterhalb einer Brücke)
- Umweltschäden: Schäden an Gewässern und Boden

Im konkreten Beurteilungsfall sind nur diejenigen Konsequenzen zu ermitteln, die einen massgeblichen Beitrag an das Risiko liefern. Im Allgemeinen sind dies Personen- und Sachschäden.

Im Sinne dieser Abgrenzung werden beispielsweise folgende Konsequenzen nicht erfasst:

- Personen- und Sachschäden durch einen Verkehrsunfall, der sich auf bzw. in dem Bauwerk ereignet, ohne dieses zu beschädigen.
- Personen- und Sachschäden beim Verursacher eines Bauwerksschadens resp. -versagens (Beispiel Anprall: Autofahrer des anprallenden Fahrzeugs).
- Personen- und Sachschäden infolge Rauchvergiftung bei einem Fahrzeugbrand im Tunnel. Es handelt sich dabei nicht um Konsequenzen eines Bauwerksversagens. Versagt hingegen ein Bauwerk auf Grund eines Brandes, so sind die daraus entstehenden Schäden zu berücksichtigen.

Die berücksichtigten Bauwerksschäden beziehen sich auf die bauliche Substanz, nicht jedoch auf Installationen (z.B. der sicherheitstechnischen Ausrüstungen).

## 4 Vorgehen

### 4.1 Überblick

Die Methodik zur Risikobeurteilung für Kunstbauten enthält ein schrittweises Vorgehen. Ziel dieses Vorgehens ist es, die Bearbeitungstiefe auf die Fragestellung abzustimmen und einzugrenzen. Das Vorgehen besteht aus den Elementen "Selektion", "Grobanalyse" und "Detailanalyse". Diese Schritte werden in den folgenden Ziffern erläutert.

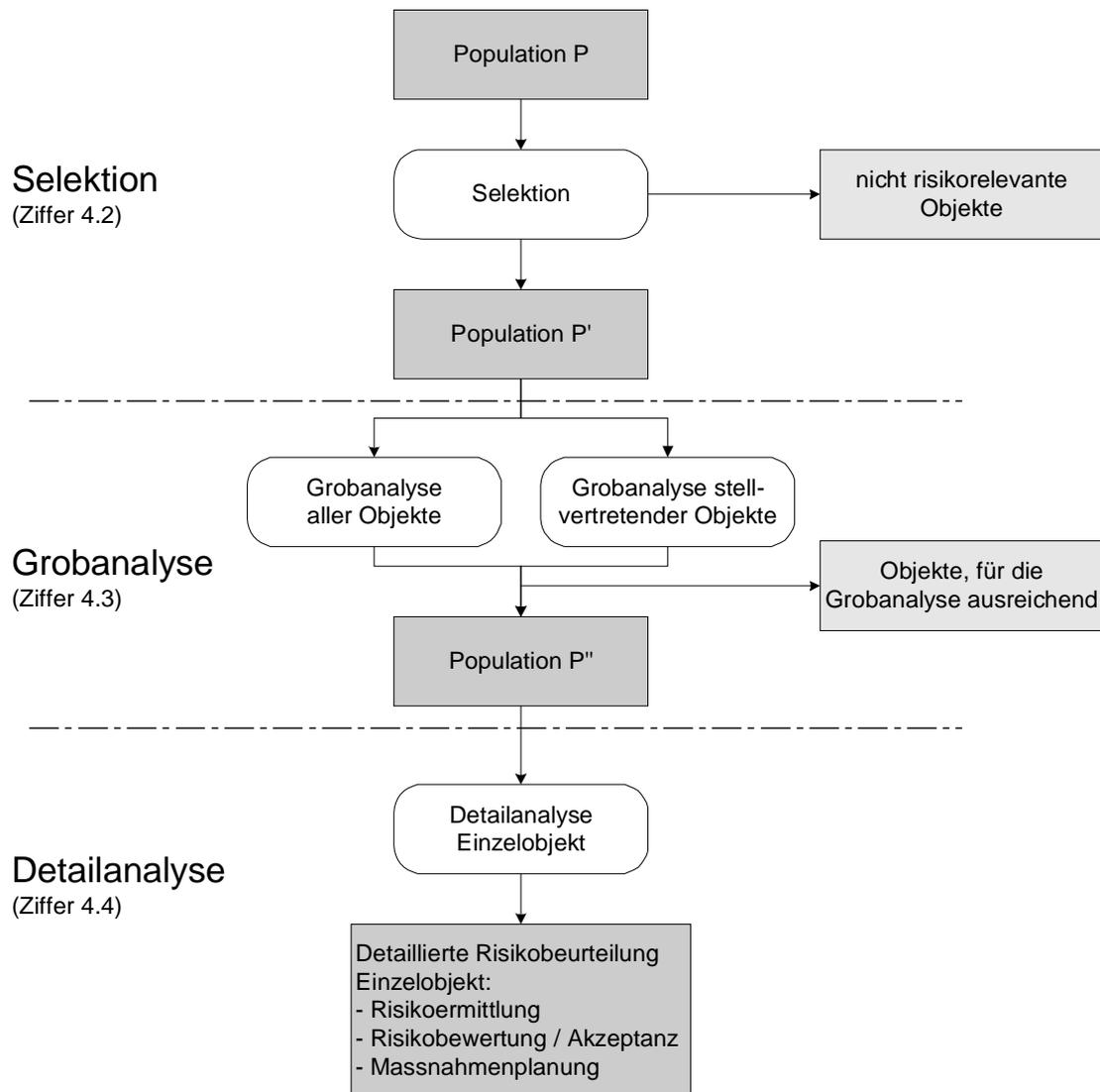


Abbildung 1: Ablauf

Im konkreten Einzelfall können auch einzelne Schritte übersprungen werden, um beispielsweise von Beginn weg eine Detailanalyse durchzuführen.

## 4.2 Selektion

### 4.2.1 Ziel der Selektion

Ziel der Selektion ist die Fokussierung auf risikorelevante Aspekte. Aus der Population der Kunstbauten eines Strassennetzes sollen diejenigen Objekte herausgefiltert werden, die bezüglich einer bestimmten Fragestellung zu untersuchen sind („risikorelevante Objekte“).

### 4.2.2 Bedeutung und Anwendung

Durch die Selektion werden die risikorelevanten Objekte aus der Population eines Strassennetzes herausgefiltert. Die Festlegung der dazu erforderlichen Selektionskriterien erfolgt auf der Basis von Erfahrung durch ein Gremium von Fachleuten. Die Kriterien sind nach Möglichkeit so zu wählen, dass die Selektion auf Grund von Daten erfolgen kann, die in der Kunstbauten-Datenbank des ASTRA (KUBA-DB) enthalten sind. Eine netzweite Selektion kann sich somit auf dieser Datenbank abstützen.

Resultat der Selektion sind Gruppen von Kunstbauten mit zumindest teilweise gleichen Eigenschaften. Einzelobjekte innerhalb einer solchen Gruppe können jedoch über die gemeinsamen Eigenschaften hinaus auch deutliche Unterschiede aufweisen.

Die Risikobeurteilung herausgefilterter Einzelobjekte erfolgt anhand der Methodik „Grob-analyse“ oder durch eine vertiefte Analyse („Detailanalyse“). Letztere ist häufig mit der Beschaffung aktueller und detaillierter Informationen zu den Objekten verbunden, z.B. durch Überprüfung der Bauteilgeometrie, mit Hilfe materialtechnologischer Untersuchungen sowie Messungen der Einwirkungen oder des Tragverhaltens.

### 4.2.3 Selektionskriterien

Die Selektionskriterien stehen für Ausprägungen (z.B. bekannte Schwachstellen) der Kunstbauten sowie für Einwirkungen, die zu einem substantiellen Risiko führen können. In zahlreichen Fällen führt erst die Kombination solcher bauwerkseitigen Aspekte, gegebenenfalls verbunden mit einer spezifischen Einwirkung, zu einem potentiellen Risiko.

Die bauwerkseitigen Selektionskriterien lassen sich in der Regel einem der folgenden Bereiche zuordnen:

- Objekte mit relevanten Tragwerksteilen, die auf Grund der Tragwirkung des Objekts, ihrer Ausbildung oder ihrer Exposition vergleichsweise leicht zu einem (Teil-)Versagen des Objekts führen können, z.B.:
  - Zugstiele von Sprengwerken mit ungünstigem Verhältnis von Mittel- und Randspannweite (Endfeld)
  - Schrägseilbrücken (mögliche Korrosion der Schrägseile, insbesondere im Bereich der Verankerungen)
  - Objekte mit Gerbergelenken (Möglichkeit fehlender oder unzureichender Aufhängebewehrung, zudem Exposition der kritischen Bereiche)
  - Überführungen mit Mittelpfeilern (Möglichkeit eines Fahrzeuganpralls)
  - Kunstbauten mit Foundationen im Bereich von Fliessgewässern (Verkolkung)
  - Steinschlagschutzgalerien, etc.

- Objekte, die nach Tragwerksnormen bemessen wurden, welche Schwachstellen aufweisen, z.B.:
  - ungeeignete Widerstandsmodelle (z.B. unzureichende Schubbewehrung bei starker Vorspannung, Durchstanzmodelle)
  - ungenügende Anforderungen (z.B. Erdbeben)
  - fehlende Behandlung wichtiger konstruktiver Details
  - zu hohe charakteristische Werte für Materialfestigkeiten, etc.
- Objekte mit Tragwerksteilen, deren aktueller Zustand unzureichend ist.

Zudem sind diejenigen Einwirkungen risikorelevant, die in den Einwirkungsnormen nicht oder nur in ungenügender Weise behandelt werden (z.B. zu geringe charakteristische Werte für Intensitäten).

Die Auswertung zukünftiger Ereignisse kann im Laufe der Zeit zu weiteren Selektionskriterien führen.

Die Identifikation der Selektionskriterien ist ein qualitativer Beurteilungsprozess, der von einem Gremium von erfahrenen Fachleuten durchzuführen ist. Wichtige Grundlage bei der Ausleageordnung potentieller Selektionskriterien ist [Vogel 2009].

Es gibt keine Gewähr, dass sämtliche risikorelevanten Objekte durch ein festgelegtes Set von Selektionskriterien erfasst werden.

### 4.3 Grobanalyse

Die Grobanalyse bezieht sich auf eine Population, die durch eine Selektion eingegrenzt wurde. Im Extremfall besteht die Population nur aus einem Einzelobjekt.

Es sind zwei Vorgehensweisen zu unterscheiden:

- Risikobeurteilung sämtlicher Einzelobjekte und Aufsummierung der Risiken der Einzelobjekte.
- Risikobeurteilung stellvertretender Einzelobjekte mit „Hochrechnung“ der Risiken auf die Population.

Welche der beiden aufgezeigten Vorgehensweisen zweckmässig ist, hängt von der Fragestellung und der Grösse der Population ab.

Die Objekte einer Population können sich im konkreten Einzelfall deutlich unterscheiden, auch wenn sie die gleichen Selektionskriterien erfüllen. Es kann daher sinnvoll sein, innerhalb einer Population weitere Gruppen von Objekten zu bilden, die möglichst gleiche Eigenschaften aufweisen.

In der Grobanalyse von einzelnen Objekten oder Stellvertretern einer Population wird auf diejenigen Einwirkungen und Einwirkungskombinationen fokussiert, die in Kombination mit den spezifischen Objekteigenschaften zu relevanten Risiken führen und daher zu berücksichtigen sind. Weitere Einwirkungen, die in der Beurteilung der Fachleute unwesentlich zum Risiko eines Objektes beitragen, werden vernachlässigt. Die Fokussierung auf die relevanten Einwirkungen entspricht dem in [Faber 2009] bezeichneten Schritt des Screenings.

Es ist zu erwarten, dass Einwirkungen, die als risikorelevant eingestuft werden, häufig ausserordentliche Einwirkungen aus der Natur oder aus der Nutzung (z.B. Fahrzeuganprall) sind.

Die Methodik der Grobanalyse ist in Kapitel 5 vertieft beschrieben. Sie lässt bezüglich Detaillierungsgrad und Aufwand, der für die Analyse betrieben wird, Spielraum offen (von der einfachen Schätzungen bis zur fundierten Analyse). Insbesondere bei der Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit, der Abbildung des Tragsystems und der Berücksichtigung von Abhängigkeiten bei Konsequenzen und Versagensmechanismen besteht Spielraum im Tiefgang der Analyse.

Die Grobanalyse der Kunstbauten liefert einen Überblick über die Risiken der untersuchten Population. Zudem ist eine grobe Massnahmenbeurteilung möglich.

Sind die Ergebnisse der Risikobeurteilung nicht ausreichend aussagekräftig, ist eine Detailanalyse durchzuführen. Dies ist der Fall, wenn

- präzise Aussagen zur Akzeptanz von Risiken erforderlich sind,
- in der Grobanalyse hohe Risiken ausgewiesen werden oder
- eine präzise, objektspezifische Massnahmenplanung (insbesondere im Kontext mit der Akzeptanz von Risiken) durchzuführen ist.

## 4.4 Detailanalyse

In der Detailanalyse wird eine umfassende Risikoanalyse am einzelnen Objekt durchgeführt. Die Risiken werden unter Berücksichtigung detaillierter objektspezifischer Eigenheiten auf Einwirkungs- und Bauwerksseite differenziert beurteilt. Zur Bestimmung aktueller Materialeigenschaften und des Bauwerkszustands können visuelle Inspektionen und messtechnische Untersuchungen an den Objekten durchgeführt werden. Der Detaillierungsgrad einer solchen Risikobeurteilung führt zu einem entsprechend hohen Aufwand für die Risikoanalyse. Die Detailanalyse wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt. Anhaltspunkte zur Durchführung von Detailanalysen können z.B. [JCSS 2001] entnommen werden.

## 5 Risikoermittlung

### 5.1 Risikobegriff

Nachfolgend wird ein methodischer Ansatz zur Risikobeurteilung für Kunstbauten vorgestellt, bei dem das Risiko  $R$  von Kunstbauten in Anlehnung an das Teilprojekt 102 in allgemeiner Form wie folgt berechnet wird:

$$R_j = \sum (h_j \cdot p_{fj} \cdot C_j)$$

mit der Ereignisrate  $h_j$ , der Versagenswahrscheinlichkeit  $p_{fj}$  im Eintretensfall eines Ereignisses, den Konsequenzen  $C_j$  und dem Index der Ereignisszenarien  $j$ . Die Ermittlung dieser Grössen wird in den Ziffern 5.3 bis 5.6 beschrieben. Das Summenzeichen steht für die Risiken über alle betrachteten Einwirkungen bzw. Einwirkungskombinationen und Konsequenzen. Diese sind in der Systemdefinition festzulegen. Auf Grund der Selektion bestehen Vorgaben zu den zu betrachtenden Einwirkungen bzw. Einwirkungskombinationen.

Das Risiko eines Einzelobjekts oder einer Gruppe von Einzelobjekten (Population) kann verstanden werden als

- Summe der Risiken sämtlich möglicher Einwirkungen:  
Die Risiken aus den einzelnen Einwirkungen werden separat ermittelt und anschliessend zum Gesamtrisiko aufsummiert.
- Summe der Risiken der risikorelevanten Einwirkungen und Einwirkungskombinationen:  
Mehrere risikorelevante Einwirkungen und Einwirkungskombinationen werden identifiziert. Die Risiken werden separat ermittelt und anschliessend zum Gesamtrisiko aufsummiert.
- Risiko der massgebenden Einwirkung bzw. Einwirkungskombination:  
Stehen mehrere risikorelevante Einwirkungen und Einwirkungskombinationen zur Auswahl, ist die „massgebende“ Einwirkung bzw. Einwirkungskombination festzulegen. Das Risiko wird bei allen untersuchten Objekten nur für diese „massgebende“ Einwirkung bzw. Einwirkungskombination ermittelt.

Welcher der drei genannten Risikobegriffe zu wählen ist, hängt von der Aufgabenstellung ab und ist in der Systemdefinition festzulegen.

Mit dem im vorliegenden Teilprojekt entwickelten methodischen Ansatz kann das Risiko von Einzelobjekten oder Populationen allen drei Risikobegriffen entsprechend ermittelt werden.

### 5.2 Umgang mit Unsicherheit

Die Methodik der vergleichenden Risikobeurteilung [Faber 2009] beschreibt verschiedene Ansätze, wie die Unsicherheit in der Risikobeurteilung berücksichtigt werden kann. In der vorliegenden Arbeit wird die Unsicherheit mit probabilistischen Methoden explizit modelliert, indem die Parameter zur Ermittlung des Risikos von Kunstbauten auf der Basis von Zufallsvariablen bestimmt werden. Das Ergebnis der Risikobeurteilung kann wiederum als Mittelwert und Standardabweichung dargestellt werden.

Die Unsicherheit nimmt mit zunehmender Detaillierung tendenziell ab. Der Aufwand zur Berücksichtigung der Unsicherheit nimmt mit einer expliziten Berücksichtigung der Unsicherheit jedoch zu. Eine (vollständige) probabilistische Ermittlung der Risiken kann bei umfassenden Betrachtungen an die Grenzen der Machbarkeit stossen bzw. nicht mit vernünftigem Zeit- und Arbeitsaufwand realisierbar sein.

Bei der Ermittlung des Risikos von Kunstbauten lassen sich folgende Bereiche bezeichnen, in denen charakteristische Unsicherheiten auftreten:

- Ermittlung der Ereignisszenarien
- Ermittlung der Ereignisraten und Versagenswahrscheinlichkeiten
- Bewertung von Konsequenzen (Personenschäden, Instandstellungskosten)
- Bewertung von Handlungsalternativen (Massnahmenkosten, weiterer Nutzen)

In Tabelle 5 sind die Unsicherheiten in diesen Bereichen dargestellt. Es werden die wichtigsten Parameter aufgeführt und bezüglich der erwarteten Unsicherheit qualitativ in "gross" oder "klein" eingestuft. Dies sind relative Aussagen, die zur Sensibilisierung bezüglich der einzelnen Parameter dienen sollen. Quantitative Werte zur Beschreibung der Unsicherheiten lassen sich daraus nicht unmittelbar ableiten.

Parameter	Unsicherheit
Risiko durch Ereignisszenarien	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ereignisraten und Versagenswahrscheinlichkeit: Da es sich um eher seltene Ereignisse handelt, kann in der Regel nur sehr beschränkt auf aussagekräftige Ereignisdaten abgestellt werden; es sind Analysemodelle zur Ermittlung der Ereignisraten und Versagenswahrscheinlichkeiten erforderlich → grosse Unsicherheit.</li> <li>– Konsequenzen der Ausfallszenarien (Bauwerksschäden, Personenschäden) → grosse Unsicherheit.</li> </ul>
Massnahmenkosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Investitionen → kleine Unsicherheit</li> <li>– Gesetzgeberische, organisatorische Massnahmen → grosse Unsicherheit (vorwiegend durch unklare Folgekosten)</li> </ul>
Zusätzlicher Nutzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kapazitätserhöhung, Erhöhung der Robustheit → grosse Unsicherheit</li> </ul>

Tabelle 5: Strukturierung der Unsicherheiten

### 5.3 Ereignisraten

Die Ereignisraten  $h_i$  möglicher Einwirkungen entsprechen der Anzahl der Ereignisse, die pro Jahr zu erwarten sind. Die Ereignisraten können teilweise aus bestehenden Unterlagen abgeleitet werden. Mögliche Instrumente und Informationsquellen für die Ermittlung der Ereignisraten sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Instrumente	Angaben
Normen, Richtlinien	z.B. Norm [SIA 261] „Einwirkungen auf Tragwerke“: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bestimmung der charakteristischen Werte der Wind- und Schneelasten erfolgt auf Grundlage jährlicher Überschreitungswahrscheinlichkeiten (je 0.02)</li> <li>▪ Angabe des Bemessungswerts der horizontalen Bodenbeschleunigung bei Erdbeben unter Annahme einer Wiederkehrperiode (475 Jahre, entsprechend einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10% in 50 Jahren).</li> </ul>
Intensitätskarten	Intensitäten von Naturgefahrenereignissen für Wiederkehrperioden 30 – 100 Jahre, 100 – 300 Jahre und mehr als 300 Jahre
Statistische Auswertungen	z.B. Unfallhäufigkeit auf Strassenabschnitten, daraus abgeleitete Unfallraten für den Strassenverkehr
Analytische Modelle	z.B. Fehler- und Ereignisbäume, kombiniert mit statistischen Auswertungen: Beispiel Ermittlung der Ereignisrate für Fahrzeuganprall durch Verknüpfung folgender Kennwerte: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ durchschnittlicher täglichen Verkehr (DTV)</li> <li>▪ Anteil des Schwerverkehrs</li> </ul>

Instrumente	Angaben
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unfallrate des Schwerverkehrs</li> <li>▪ Wahrscheinlichkeit eines Fahrzeuganpralls bei Unfall</li> <li>▪ kritische Länge für einen Fahrzeuganprall</li> <li>▪ Distanz Fahrbahnrand – Brückenpfeiler</li> </ul>
Schätzung durch Erfahrungsträger	Ereignisraten von Einwirkungen, zu denen nur wenige oder keine Grundlagen zur Verfügung stehen (z.B. Gletscherabbruch, Sabotage, Terroranschlag) oder eine detaillierte Analyse zu aufwändig ist.

Tabelle 6: Ermittlung von Ereignisraten

Bei der Ermittlung der Ereignisraten von Einwirkungskombinationen ist zusätzlich festzulegen, welches die Leiteinwirkungen und die Begleiteinwirkungen sind.

Einwirkungskombinationen werden mit Hilfe der Regel von Turkstra erfasst [Turkstra 1972]. Nach dieser Regel ist zunächst eine Leiteinwirkung zu wählen und ihre maximale Grösse zu finden. Diese wird mit den Amplituden sämtlicher Begleiteinwirkungen zu diesem Zeitpunkt überlagert. Diese Kombination aus Leit- und Begleiteinwirkungen ist für alle denkbaren Leiteinwirkungen durchzuführen. Der maximale Wert der Lasteinwirkung aus den untersuchten Lastkombinationen ist massgebend. Leiteinwirkungen werden dabei als Extremwertverteilungen abgebildet, Begleiteinwirkungen mit Augenblicksverteilungen. Die Regel nach Turkstra liegt auf der unsicheren Seite, da eine noch ungünstigere Lasteinwirkung zu einem Zeitpunkt auftreten kann, an dem keine der Einwirkungen ihren Maximalwert aufweist. In der Regel kommt sie der ungünstigsten Situation jedoch nahe.

Bei der Ermittlung der Ereignisraten von Einwirkungskombinationen werden Leiteinwirkungen als Extremwertverteilungen, Begleiteinwirkungen in Form von Augenblicksverteilungen abgebildet. Es sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- Sind die Extremwertverteilung der Leiteinwirkung und die Augenblicksverteilungen der Begleiteinwirkungen auf den Zeitraum eines Jahres bezogen, ist die Ereignisrate implizit enthalten und beträgt 1.0.
- Sollen Einwirkungen diskret mit charakteristischer Intensität abgebildet werden, ist diesen eine Wiederkehrperiode zuzuweisen. Diese lässt sich anhand diverser Instrumente ableiten (siehe Tabelle 6).
- Sollen Einwirkungen, die als Verteilung dargestellt sind, mit diskreten Einwirkungen kombiniert werden, ist das bestgeeignete Vorgehen zur Ermittlung der Ereignisrate der Einwirkungskombination im Einzelfall festzulegen (u.a. [Spaethe 1992]).

Eine mögliche Vereinfachung bei der Ermittlung der Ereignisraten von Einwirkungskombinationen besteht in der deterministischen Eingrenzung der möglichen Gefährdungsbilder auf die „massgebenden“ Gefährdungsbilder bzw. sogar auf das alleinige „massgebende“ Gefährdungsbild. Bei diesem Vorgehen wird jedoch nur ein Ausschnitt aus dem gesamten möglichen Einwirkungsspektrum erfasst.

Die Unsicherheiten der Ereignisraten lassen sich erfassen, indem diese als Zufallsvariablen abgebildet werden.

## 5.4 Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerksteils

### 5.4.1 Grenzzustandsfunktionen

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerksteils im Eintretenfall eines Ereignisses ergibt sich aus der Gegenüberstellung der Intensität der Einwirkungen und der Höhe des Widerstands eines Tragwerksteils (siehe Abbildung 2). Im Überlappungsbereich der beiden Verteilungen besteht die Möglichkeit, dass der Widerstand eines Tragwerksteils  $R$  geringer ist als die Summe der Einwirkungen  $E$ , was ein Versagen des Tragwerksteils zur Folge hätte.

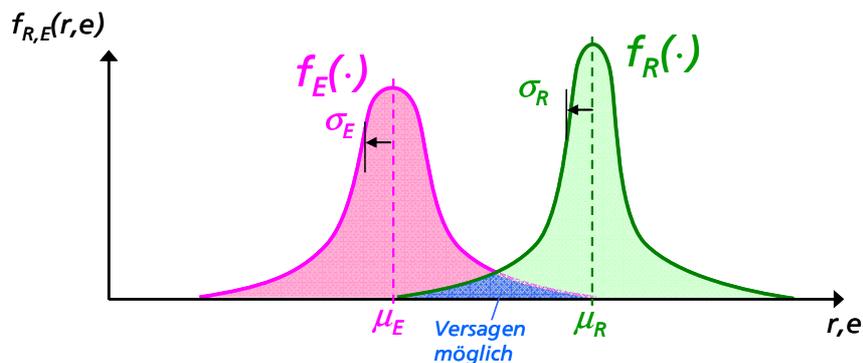


Abbildung 2: Summe der Einwirkungen  $E$  und Bauwerksteilwiderstand  $R$

Die Versagenswahrscheinlichkeit wird ermittelt mit Hilfe der Grenzzustandsfunktion:

$$G = R - E \quad (\text{Gl. 1})$$

Der Bereich, in dem die Grenzzustandsfunktion  $G$  (auch Sicherheitsmarge  $M$  genannt) Werte kleiner 0 aufweist, stellt die Versagenswahrscheinlichkeit dar. Der zugehörige Sicherheitsindex  $\beta$  wird mit Hilfe der Parameter der Sicherheitsmarge  $M$  dargestellt und berechnet zu:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (\text{Gl. 2})$$

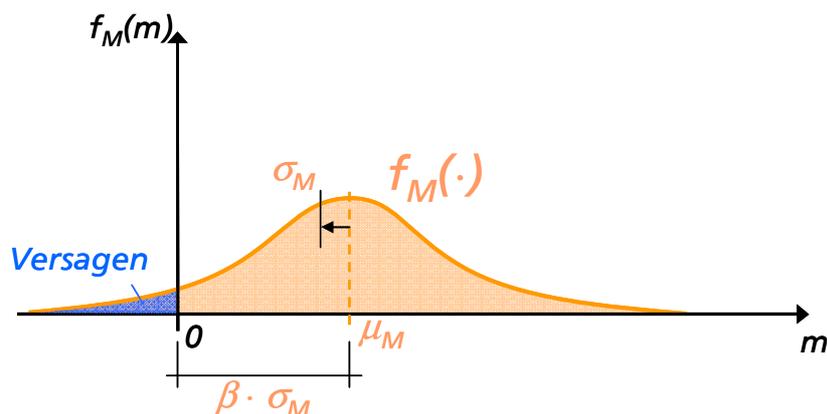


Abbildung 3: Sicherheitsmarge  $M = R - E$

## 5.4.2 Methodischer Ansatz

Gemäss Ziffer 2.2 ist eine Anforderung an die zu entwickelnde Methodik, dass der Aufwand zur Umsetzung in einer Grössenordnung liegen soll, welche die Anwendung auf ausgedehnte Populationen von Objekten zulässt. Die Methodik soll daher ohne aufwändige Arbeiten auskommen, wie rechnerische Nachweise der Tragfähigkeit oder eingehendes Studium bestehender Bauwerksunterlagen zur Tragwerksbemessung. Eine weitere Anforderung besteht darin, dass ein probabilistischer Ansatz zu erarbeiten ist, der den Widerstand eines Bauwerks bzw. eines Tragwerksteils den Einwirkungen gegenüberstellt.

Als Ausgangsgrösse für die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerksteils sind auf Basis der Normen, nach denen das Tragwerkteil bemessen wurde, die Tragwiderstände zu bestimmen, die es zum Zeitpunkt der Errichtung des Bauwerks zum Mindesten aufwies. Sind die ursprünglichen mechanischen Eigenschaften eines Tragwerksteils unmittelbar bekannt (z.B. bei einem Stahlprofil), kann auf diesen Schritt verzichtet werden. In einem zweiten Schritt wird unter Verwendung des aktualisierten Widerstands des Tragwerksteils und der aktualisierten Einwirkungen die Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerksteils probabilistisch ermittelt. Grundlage dieses zweiten Schritts sind entweder die im ersten Schritt ermittelten Mindestabmessungen des Tragwerksteils oder - falls unmittelbar bekannt – dessen ursprünglichen mechanischen Eigenschaften.

Die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit kann in unterschiedlicher Detaillierung durchgeführt werden. Nachfolgend ist das Vorgehen allgemein beschrieben.

### Schritt 1: Bestimmung der Mindestabmessungen

Dieser Schritt ist für den Fall erforderlich, dass die ursprünglichen mechanischen Eigenschaften eines Tragwerksteils nicht unmittelbar bekannt sind. Liegen diese Angaben vor, kann auf den Schritt 1 verzichtet werden.

Als Ausgangsgrösse für die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerksteils sind auf Basis der Normen, nach denen das Tragwerkteil bemessen wurde, die Tragwiderstände zu bestimmen, die es zum Zeitpunkt der Errichtung des Bauwerks zum Mindesten aufwies. Unter Verwendung der charakteristischen Festigkeiten und der Teilsicherheitsbeiwerte der jeweiligen Norm werden dazu auf der sicheren Seite liegend die mindestens erforderlichen Abmessungen des Tragwerksteils ermittelt, die sich deterministisch auf Grundlage der Tragwerks- und Einwirkungsnormen ergeben, nach denen das Tragwerkteil bemessen wurde. Die Mindestabmessungen resultieren aus der Gegenüberstellung des Widerstands eines Tragwerksteils  $R$  und der massgebenden Einwirkungen  $E$  sowie der Anforderung, dass der Widerstand eines Tragwerksteils mindestens den Schnittgrössen entsprechen muss,  $G = R - E \geq 0$ . Diese Gegenüberstellung ist für alle in Frage kommenden Versagensmechanismen durchzuführen, z. B. Biegung (Betondruckzone, Biegebewehrung), Querkraft (Betondruckstreben, Schubbewehrung) und Normalkraft (Betondruckzone, ggf. Druckbewehrung).

Existierten zum Zeitpunkt der Bemessung eines Einzelobjekts zu einer Einwirkung keine normativen Anforderungen, bestehen folgende Möglichkeiten zur Festlegung eines charakteristischen Wertes der Einwirkung:

- Abschätzen anhand der normativen Anforderungen zu vergleichbaren Einwirkungen (gleicher Einwirkungstyp, gleicher Angriffspunkt und gleiche Wirkungsrichtung)
- Übernehmen der Werte aus der Bemessung des Tragwerks
- Festlegung durch Expertengremium
- Durchführung einer Detailanalyse (siehe Ziffer 4.4)

## Schritt 2: Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit

Die Einwirkungen und die Widerstände eines Tragwerksteils werden in einem zweiten Schritt aktualisiert, wobei die aktuell gültigen Einwirkungs- und Tragwerksnormen zu Grunde gelegt werden. Grundlage dieses zweiten Schritts sind entweder die in Schritt 1 ermittelten Mindestabmessungen des Tragwerksteils oder - falls unmittelbar bekannt (z.B. bei einem Stahlträger) – dessen ursprüngliche mechanischen Eigenschaften.

Die in Schritt 1 ermittelten Mindestabmessungen eines Tragwerksteils bzw. dessen bekannte ursprünglichen mechanischen Eigenschaften werden in der Regel als deterministische Grösse erfasst, können jedoch auch als Zufallsvariable abgebildet werden. Die weiteren Grössen, die den Widerstand eines Tragwerksteils  $R$  bestimmen (z. B. Materialfestigkeiten) sowie die Einwirkungen  $E$  dagegen werden in diesem Schritt als Zufallsvariablen mit unterschiedlichen Verteilungstypen, Mittelwerten  $\mu$  und Standardabweichungen  $\sigma$  modelliert. Die Variationskoeffizienten der Zufallsvariablen werden als konstant angenommen. Somit werden die aleatorischen Unsicherheiten von Einwirkungen und Widerstand des Tragwerksteils berücksichtigt. Epistemische Unsicherheiten werden durch Zufallsvariablen erfasst, z. B. für die Betondruckfestigkeit bzw. die Zugfestigkeit des Bewehrungsstahls sowie für die Modellunsicherheit des Lastmodells (Vorschläge für diese Zufallsvariablen werden in [Schubert 2008] unterbreitet).

Aus der Gegenüberstellung der aktualisierten Zufallsvariablen der Einwirkungen  $E_{akt}$  und des Widerstands eines Tragwerksteils  $R_{akt}$  ergibt sich gemäss Ziffer 5.4.1 die aktualisierte Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerksteils für den untersuchten Versagensmechanismus.

Bei der Aktualisierung der Einwirkungen und des Widerstands eines Tragwerksteils werden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Unterschiede zwischen Bemessungsnormen und aktuellen Normen hinsichtlich:
  - charakteristischer Werte der Einwirkungen und Materialeigenschaften
  - zu berücksichtigender Einwirkungskombinationen
  - Widerstandsmodelle
  - Teilsicherheitsbeiwerte
- nachträglich ausgeführte Schutz- oder Verstärkungsmassnahmen
- der aktuelle Zustand eines Bauwerks

Diese Einflüsse werden in den Grenzzustandsfunktionen  $G = R_{akt} - E_{akt}$  berücksichtigt, indem die Parameter der Zufallsvariablen auf Seite des Widerstands eines Tragwerksteils bzw. der Einwirkungen entsprechend angepasst werden.

In Abbildung 4 ist beispielhaft die Aktualisierung einer Zustandsverschlechterung eines Tragwerksteils dargestellt: Der Widerstand des Tragwerksteils zum Zeitpunkt der Bauwerkserstellung wird durch die Zufallsvariable  $R$  ausgedrückt. Erfährt ein Tragwerksteil eine deutliche Verschlechterung des Zustands, reduziert sich dessen Widerstand (beispielsweise ab Zustandskategorie 4) auf den Wert  $R_{akt}$ . Der Mittelwert  $\mu_R$  des Widerstands  $R$  erfährt eine Reduktion  $\Delta\mu_R$ , deren Grösse vom Umfang der Zustandsverschlechterung abhängt. Die zeitlichen Entwicklungen relevanter Materialeigenschaften können hierzu detailliert erfasst werden. Vereinfacht lassen sich Widerstandsverluste pauschal in Abhängigkeit der aktuellen Zustandskategorie eines Tragwerksteils abbilden (z.B. -5% des ursprünglichen Mittelwertes  $\mu_R$  für Zustandskategorie 4, -15% für Zustandskategorie 5). Die Standardabweichung wird tendenziell zunehmen ( $\sigma_{R,akt} > \sigma_R$ ). Aus der Anpassung der Widerstandsverteilung von  $R$  zu  $R_{akt}$  ergeben sich für das betrachtete Tragwerksteil aktualisierte Versagenswahrscheinlichkeiten für die diversen Versagensmechanismen.

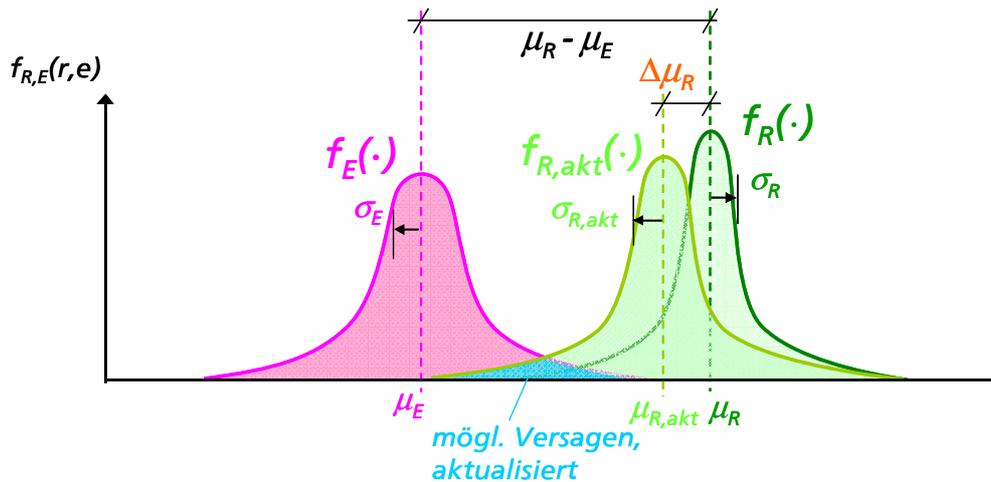


Abbildung 4: Ermittlung der aktualisierten Versagenswahrscheinlichkeit: Wirkung der Einflussgrößen, Beispiel schlechter Zustand eines Tragwerksteils

Im gleichen Sinne, das heisst durch Anpassung der Zufallsvariablen der Einwirkungen  $E$  resp. des Widerstands  $R$ , werden die Einflüsse der zuvor aufgeführten weiteren Aspekte erfasst.

Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten erfolgt mit Hilfe einer FORM-Analyse oder einer Simulation.

### 5.4.3 Bandbreite bei der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit

Im Schritt 1 des zuvor beschriebenen methodischen Ansatzes besteht eine grosse Bandbreite hinsichtlich des Detaillierungsgrades, mit dem die Mindestabmessungen eines Tragwerksteils ermittelt werden. Der zweite Schritt, in dem die Versagenswahrscheinlichkeiten eines Tragwerksteils für die in Frage kommenden Versagensmechanismen ermittelt werden, wird entsprechend dem zuvor gewählten Detaillierungsgrad durchgeführt.

#### Detaillierte Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit:

Bei einer detaillierten Ermittlung der Mindestabmessungen eines Tragwerksteils werden die Widerstände eines Tragwerksteils entsprechend der Tragwerksnorm, nach der das Tragwerkteil bemessen wurde, genau abgebildet, z.B. der Biegewiderstand von Tragwerkteilen aus Stahlbeton (hier nach [SIA 262]):

$$M_{Rd,c} = A_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} z \quad (\text{Betondruckzone})$$

$$M_{Rd,s} = A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s} z \quad (\text{Biegebewehrung})$$

mit  $M_{Rd,c}, M_{Rd,s}$  maximale Biegewiderstände (Betondruckzone, Biegebewehrung)  
 $A_c, A_s$  Querschnittsflächen Beton, Betonstahl  
 $z$  Hebelarm der inneren Kräfte

Dem Widerstand des Bauwerksteils werden die von den Einwirkungen verursachten Schnittgrößen gegenübergestellt, die sich entsprechend der Einwirkungsnorm ergeben, nach der die Bemessung eines Bauwerkes erfolgte (Beispiel Biegebelastung):

$$M_{Ed,x} = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \sum \psi_j \cdot Q_{kj}$$

mit	$M_{Ed}$	Bemessungswerte Biegemoment, Quer- und Normalkraft
	$G_k, Q_{k1}, Q_{kj}$	Charakteristische Werte der ständigen Einwirkungen, der veränderlichen Leiteinwirkung und der $j$ -ten veränderlichen Einwirkung
	$\gamma_G, \gamma_{Q1}, \psi$	Lastbeiwerte der ständigen Einwirkungen, der veränderlichen Leiteinwirkung und der $j$ -ten veränderlichen Einwirkung
	$X := el,$	elastisch, plastisch

Hierbei ist in Abhängigkeit des Versagensmechanismus festzulegen, ob ein elastisches oder plastisches Materialverhalten zugrunde gelegt werden soll.

Die Schnittgrössen sind in innere Kräfte umzurechnen (Beispiel Biegemoment: Druckkraft in der Betondruckzone und Zugkraft in der Biegebewehrung). Aus der Gegenüberstellung der Widerstände eines Tragwerksteils und der inneren Kräfte, die sich aus den Einwirkungen ergeben, resultieren die Mindestabmessungen, die ein Tragwerksteil gemäss Tragwerks- und Einwirkungsnormen, nach denen es bemessen wurde, aufzuweisen hat. Die Grenzzustandsgleichung  $G = R - E \geq 0$  für die Betondruckzone eines biegebelasteten Tragwerksteils aus Stahlbeton hat folgendes Aussehen:

$$G = A_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} z - (\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \sum \psi_j \cdot Q_{kj}) = 0$$

Die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit erfolgt im Schritt 2 anhand der aktualisierten Werte dieser Grössen. Die Grenzzustandsgleichung für die Betondruckzone eines biegebelasteten Tragwerksteils aus Stahlbeton nimmt folgendes Aussehen an:

$$G = A_c \cdot f_{ck} \cdot z \cdot m \cdot \varepsilon - (G_{k,akt} + Q_{k1,akt} + \sum Q_{kj,akt}) = 0$$

mit	$A_c$	Querschnittsfläche Beton (aus Schritt 1)
	$f_{ck}$	charakteristischer Wert der Betonzylinderdruckfestigkeit (Zufallsvariable)
	$z$	Hebelarm der inneren Kräfte
	$m$	Faktor für Unterschiede in den Widerstandsmodellen
	$\varepsilon$	Faktor für Zustandsverschlechterung
	$G_{k,akt}$	aktualisierter Wert der ständigen Einwirkungen
	$Q_{k1,akt}$	aktualisierter Wert der veränderlichen Leiteinwirkung
	$Q_{kj,akt}$	aktualisierter Wert der $j$ -ten veränderlichen Einwirkung (Zufallsvariablen)

Das weitere Vorgehen zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit erfolgt wie in Ziffer 5.4.2 ausgeführt.

#### Vereinfachte Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit:

Die Mindestabmessungen eines Tragwerksteils können im Schritt 1 auf Grundlage der Tragwerks- und Einwirkungsnormen, nach denen ein Tragwerksteil bemessen wurde, auch in vereinfachter Form ermittelt werden. Die Unsicherheit nimmt jedoch mit zunehmender Vereinfachung zu (vgl. Ziffer 5.2).

In der Grenzzustandsgleichung  $G = R - E \geq 0$  wird der Widerstand eines Tragwerksteils lediglich in Form der relevanten Festigkeit des betrachteten Materials abgebildet, z. B. der Betonzylinderdruckfestigkeit oder der Fließspannung des Betonstahls.

Die Einwirkungen werden ebenfalls vereinfacht erfasst: Es werden lediglich die Totale (gleichgerichteter) ständiger bzw. veränderlicher Einwirkungen gebildet, so dass deren Verhältnis bestimmbar ist. Für ausschliesslich identische Lasttypen (z. B. Flächenlasten, Einzellasten) entspricht dies dem einfachen Aufsummieren der charakteristischen Werte der Einwirkungen. Liegen unterschiedliche Lasttypen vor, können die Schnittgrössen der Einwirkungen („Auswirkungen“) stellvertretend an einem einfachen statischen Ersatzsystem ermittelt werden. In diesem Fall wird das Verhältnis der Auswirkungen aus ständigen und veränderlichen Einwirkungen bestimmt.

In der Grenzzustandsgleichung  $G = R - E \geq 0$  wird ein Bemessungswert  $d$  eingeführt, welcher für die Mindestabmessungen des untersuchten Tragwerksteils steht. Die Grenzzustandsgleichungen für ein auf Biegung belastetes Tragwerksteil aus Stahlbeton nehmen folgende Form an:

$$G = d_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} - \alpha_G \cdot P_G \cdot \gamma_G - \alpha_Q \cdot P_Q \cdot \gamma_Q = 0 \quad (\text{Betondruckzone})$$

$$G = d_s \cdot \frac{f_{sk}}{\gamma_s} - \alpha_G \cdot P_G \cdot \gamma_G - \alpha_Q \cdot P_Q \cdot \gamma_Q = 0 \quad (\text{Biegebewehrung})$$

mit	$d_c, d_s$	Bemessungswerte Betondruckzone, Betonstahl
	$f_{ck}$	charakteristischer Wert der Betonzylinderdruckfestigkeit
	$f_{sk}$	charakteristischer Wert der Fließspannung des Betonstahls
	$\alpha_G$	Anteil der ständigen Einwirkungen
	$\alpha_Q$	Anteil der veränderlichen Einwirkungen ( $\alpha_Q = 1 - \alpha_G$ )
	$P_G$	Total der ständigen Einwirkungen oder deren Auswirkungen
	$P_Q$	Total der veränderlichen Einwirkungen oder deren Auswirkungen
	$\gamma_c, \gamma_s$	Widerstandsbeiwerte für Beton und Betonstahl
	$\gamma_G, \gamma_Q$	Lastbeiwerte für ständige und veränderliche Einwirkung

Resultat dieser Betrachtungen sind pro Versagensmechanismus die für ein spezifisches Verhältnis der ständigen Einwirkungen  $P_G$  zu den veränderlichen Einwirkungen  $P_Q$  ermittelten Bemessungswerte  $d$  der betrachteten Tragwerksteile gemäss der Einwirkungs- und Tragwerksnormen, nach denen ein Bauwerk bemessen wurde. Die Bemessungswerte  $d$  sind nur abhängig von der Normengeneration, nach der ein Bauwerksteil bemessen wurde, nicht jedoch vom betrachteten Kunstbautentyp bzw. dem Tragwerksteil.

Die Versagenswahrscheinlichkeiten werden im Schritt 2 berechnet, indem die in den widerstands- und einwirkungsseitigen Modellen beinhalteten Unsicherheiten in die Betrachtung eingeschlossen werden. Beispielsweise ergeben sich für auf Biegung belastete Tragwerksteile aus Stahlbeton folgende Grenzzustandsgleichungen:

$$G = d_c \cdot m \cdot \varepsilon \cdot X_{fc} \cdot f_c - X_M \cdot (\alpha_G \cdot P_{G,akt} + \alpha_Q \cdot P_{Q,akt}) = 0 \quad (\text{Betondruckzone})$$

$$G = d_s \cdot m \cdot \varepsilon \cdot X_{fs} \cdot f_s - X_M \cdot (\alpha_G \cdot P_{G,akt} + \alpha_Q \cdot P_{Q,akt}) = 0 \quad (\text{Biegebewehrung})$$

mit	$d_c, d_s$	Bemessungswerte Betondruckzone, Betonstahl
	$m$	Faktor für Unterschiede in den Widerstandsmodellen
	$\varepsilon$	Faktor für Zustandsverschlechterung
	$f_c$	Betonzylinderdruckfestigkeit (Zufallsvariable)
	$f_s$	Fließspannung des Betonstahls (Zufallsvariable)
	$\alpha_G$	Anteil der ständigen Einwirkungen
	$\alpha_Q$	Anteil der veränderlichen Einwirkungen ( $\alpha_Q = 1 - \alpha_G$ )
	$P_{G,akt}$	aktualisiertes Total der ständigen Einwirkungen oder deren Auswirkungen (Zufallsvariable)
	$P_{Q,akt}$	aktualisiertes Total der veränderlichen Einwirkungen oder deren Auswirkungen (Zufallsvariable)
	$X_{fc}, X_{fs}, X_M$	Modellunsicherheiten zu Materialfestigkeiten und Lastmodellen (Zufallsvariablen)

Das weitere Vorgehen zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit erfolgt wie in Ziffer 5.4.2 ausgeführt.

## 5.5 Gesamtversagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerks

In der Regel weisen Tragwerksteile mehrere mögliche Versagensmechanismen auf, und Bauwerke bestehen wiederum aus mehreren Tragwerksteilen. Mit Hilfe des in den vorhergehenden Ziffern beschriebenen methodischen Ansatzes wurde jedoch zunächst lediglich die Versagenswahrscheinlichkeit für einzelne Versagensmechanismen eines Tragwerksteils aufgezeigt. Diese Versagenswahrscheinlichkeiten bzw. die zugrunde liegenden Versagensmechanismen sind zu kombinieren, um eine Aussage zur Versagenswahrscheinlichkeit eines gesamten Bauwerks zu erhalten.

Bei der Kombination der einzelnen Versagensmechanismen ist das Tragsystem eines Bauwerks möglichst realistisch abzubilden. Grundlegend werden dabei serielle und parallele Systeme unterschieden. Bei Serie-Systemen impliziert der Ausfall eines Elementes das Versagen des gesamten Systems, während bei idealen Parallelsystemen alle Elemente versagen müssen, bevor ein Systemversagen eintritt.

Innerhalb eines Systems hat der Korrelationsgrad der Versagensmechanismen einen relevanten Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems. Die beiden Extremfälle, absolute Unabhängigkeit bzw. vollständige Korrelation der Versagensmechanismen, fassen die Realität in weiten Grenzen ein.

Die Zuverlässigkeit eines Serie-Systems ist durch die Wahrscheinlichkeit gegeben, dass keines seiner Elemente versagt. Sind die Elemente des Systems statistisch unabhängig, also nicht korreliert, berechnet sich die Versagenswahrscheinlichkeit zu:

$$p_f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{fi}) \approx \sum_{i=1}^n p_{fi}$$

mit	$p_f$	Versagenswahrscheinlichkeit des Serie-Systems
	$p_{fi}$	Versagenswahrscheinlichkeit eines Elements
	$i$	Index Elemente
	$n$	Anzahl Elemente

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Serie-Systems mit nicht korrelierten Elementen ist somit stets grösser als diejenige seines unzuverlässigsten Elements. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems vergrößert sich mit steigender Anzahl Elemente.

Sind die Elemente eines Serie-Systems vollständig korreliert, gilt:

$$p_f = \max[p_{fi}]$$

mit	$p_f$	Versagenswahrscheinlichkeit des Serie-Systems
	$p_{fi}$	Versagenswahrscheinlichkeit eines Elements
	$i$	Index Elemente

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Serie-Systems kann somit wie folgt eingegrenzt werden:

$$\max[p_{fi}] \leq p_f \leq 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{fi}) < \sum_{i=1}^n p_{fi}$$

Die Zuverlässigkeit eines Parallel-Systems ist durch die Wahrscheinlichkeit gegeben, dass sämtliche seiner Elemente versagen. Sind die Elemente des Systems statistisch unabhängig, also nicht korreliert, berechnet sich die Versagenswahrscheinlichkeit zu:

$$p_f = p_{f1} \cdot p_{f2} \cdot \dots = \prod_{i=1}^n p_{fi}$$

mit	$p_f$	Versagenswahrscheinlichkeit des Parallel-Systems
	$p_{fi}$	Versagenswahrscheinlichkeit eines Elements
	$i$	Index Elemente
	$n$	Anzahl Elemente

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Parallel-Systems mit nicht korrelierten Elementen ist somit stets geringer als diejenige seines unzuverlässigsten Elements. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems verringert sich mit steigender Anzahl Elemente.

Sind die Elemente eines Parallel-Systems vollständig korreliert, gilt:

$$p_f = \min[p_{fi}]$$

mit  $p_f$  Versagenswahrscheinlichkeit des Parallel-Systems  
 $p_{fi}$  Versagenswahrscheinlichkeit eines Elements  
 $i$  Index Elemente

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Parallel-Systems kann somit wie folgt eingegrenzt werden:

$$\prod_{i=1}^n p_{fi} \leq p_f \leq \min[p_{fi}]$$

Für Parallel-Systeme ist streng genommen duktiles und sprödes Versagen zu unterscheiden, da sie oftmals auf die anhaltende Tragwirkung von versagenden Elementen, z.B. einem plastischen Gelenk, angewiesen sind. Sprödes Materialverhalten bzw. – versagen vergrößert die Versagenswahrscheinlichkeit eines Systems erheblich.

Tragwerke können meist in mehreren Formen versagen. Sie entsprechen in der Regel Serie-Systemen von Elementen, die je einen Versagenspfad charakterisieren. Dies gilt generell für statisch bestimmte Tragwerke, im Wesentlichen auch für statisch unbestimmte Tragwerke. Die Versagenspfade statisch unbestimmter Systeme können Parallel-Systemen entsprechen. Die den Versagenspfaden entsprechenden Elemente weisen meist eine Korrelation auf, da sie gemeinsame Eigenschaften besitzen, sie z. B. aus dem gleichen Material bestehen oder die gleichen Einwirkungen erfahren.

Die genaue und vollständige Abbildung der einzelnen Versagenspfade eines Tragwerks und die anschliessende Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit sind in den meisten Fällen, insbesondere im Fall statisch unbestimmter Tragwerke, sehr aufwändig. Es bestehen folgende Möglichkeiten der Vereinfachung:

- Ein sinnvolles Vorgehen bei der Beurteilung solcher Bauwerke ist es, zunächst die Summe der Versagenswahrscheinlichkeiten der möglichen Versagensmechanismen zu ermitteln. Ist dieser Wert akzeptierbar, kann er für die Ermittlung des Risikos verwendet werden. Die mit diesem Vorgehen berechnete Versagenswahrscheinlichkeit liegt auf der sicheren Seite, da sie näherungsweise dem oberen Grenzwert für die Versagenswahrscheinlichkeit eines Serie-Systems entspricht.
- Bei der Abbildung eines Tragwerks werden nur diejenigen Versagenspfade berücksichtigt, die ein hohes Ausmass an Konsequenzen nach sich ziehen. Hierbei stehen Versagensmechanismen im Vordergrund, die zu einem schlagartigen (Teil-)Versagen eines Bauwerks führen und im Gegensatz zu einem Versagen mit Vorankündigung in der Regel Personenschäden verursachen. Die mit diesem Vorgehen berechnete Versagenswahrscheinlichkeit liegt auf der unsicheren Seite, da diejenigen Versagensmechanismen, die für das Risiko weniger relevant sind, nicht erfasst werden.
- Die vorgenannten Vereinfachungen – Ermitteln des oberen Grenzwerts für ein Serie-System und Berücksichtigung nur der Versagensmechanismen, die zu einem schlagartigen (Teil-)Versagen des Bauwerks führen - können miteinander kombiniert werden.

## 5.6 Konsequenzen

In der vorliegenden Arbeit werden direkte Konsequenzen berücksichtigt, zu denen die Schäden am Bauwerk selbst sowie unmittelbare Folgen einer Schädigung bzw. eines Bauwerksversagens gezählt werden. Letztere umfassen insbesondere Personenschäden, die durch ein (Teil-)Versagen eines Bauwerks verursacht werden. Unsicherheiten direkter Konsequenzen werden erfasst, indem die Konsequenzen als Zufallsvariablen abgebildet werden (Schätzungen).

Die Konsequenzen werden zunächst als Schadensindikatoren, wie Anzahl Verletzte und Todesopfer, etc., ermittelt und in einem zweiten Schritt einheitlich in monetarisierter Form angegeben mit der Einheit CHF / Ereignis (siehe Ziffer 6.1).

Für eine detaillierte Risikoermittlung ist es angemessen, das mit einem Bauwerksversagen einhergehende Schadensausmass objektweise für die in Frage kommenden Versagenspfade differenziert abzuschätzen. Dabei stehen folgende Parameter im Vordergrund:

- Kunstbautentyp
- Bauwerksgeometrie und –grösse
- Art der Einwirkung(en): Angriffspunkt, Wirkungsrichtung, Eintretensart (schlagartig, kontinuierlich steigend)
- Tragwerkssystem: serielles System, paralleles System
- Art des Versagens, Materialverhalten: duktil, spröde

Eine differenzierte Festlegung des Schadensausmasses für sämtliche Versagensmechanismen ist aufwändig. Im Rahmen einer Grobanalyse kann die Abschätzung des Schadensausmasses auch in vereinfachter Form erfolgen. Das sinnvolle Mass allfälliger Vereinfachungen richtet sich dabei nach dem Detaillierungsgrad, mit dem die Ereignisraten und insbesondere die Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerks ermittelt wurden. In Tabelle 7 ist eine stark vereinfachte Abschätzung des Schadensausmasses am Beispiel einer mehrfeldrigen Strassenbrücke mit Durchlaufträger für zwei unterschiedliche Einwirkungen dargestellt.

Einwirkung	Mittelwerte Sachschäden an Kunstbauten
Erdbeben	Annahme: 100 % der Brücke sind zerstört Kosten: 100 % des Wiederbeschaffungswertes
Fahrzeuganprall	Annahme: Durch Versagen des Mittelpfeilers infolge Fahrzeuganpralls stürzen 2 Brückenfelder ein, die benachbarten Felder werden dadurch zu 50% beschädigt. Total: 3 zu 100% geschädigte Brückenfelder. Die Kosten werden auf Basis des Wiederbeschaffungswertes abgeschätzt im Verhältnis der Länge von 3 Brückenfeldern (2 zerstörte Brückenfelder sowie 2 zu 50% beschädigte Brückenfelder) zur Gesamtlänge der Brücke: Kosten: Wiederbeschaffungswert der Brücke x Länge von 3 Brückenfeldern / Gesamtlänge der Brücke

Tabelle 7: Beispiele zur vereinfachten Abschätzung der Sachschäden an Kunstbauten, inklusive Monetarisierung

Bei den Personenschäden, die unmittelbar durch ein (Teil-)Versagen eines Bauwerks verursacht werden, werden Verletzte und Todesopfer berücksichtigt. Deren Anzahl kann für die verschiedenen Kunstbautentypen in vereinfachter Form z. B. über das Verhältnis „Anzahl Verletzte resp. Todesopfer / m<sup>2</sup> eingestürzter Bauwerksfläche“ abgeschätzt werden. Zu einigen Kunstbautentypen wird eine weitergehende Differenzierung dieses Faktors angezeigt sein, z.B. nach der Höhe des durchschnittlichen täglichen Verkehrs, der Art einer Überführung (über eine Strasse, über einen Wasserweg, über eine Eisenbahnlinie), etc.

In gleicher Weise wie Personenschäden werden auch Sachschäden bei Benutzern und Dritten, die unmittelbar durch ein (Teil-)Versagen eines Bauwerks verursacht werden, abgeschätzt. Es werden Schäden an Fahrzeugen und an geladener Ware berücksichtigt (pauschale Werte).

## 6 Risikobewertung

### 6.1 Bewertungsmethodik

Das Ergebnis der Risikoermittlung (Kapitel 5) sind erwartete Konsequenzen, beschrieben durch Schadensbilder zu Bauwerken, durch die Anzahl Todesopfer und Verletzter pro Jahr, etc. Für die Risikobewertung werden die Konsequenzen in monetarisierter Form ausgedrückt und anhand der festgelegten Kriterien bewertet (Optimierung und Akzeptanz).

Die Bewertungskriterien basieren auf den Vorgaben der Methodik für eine vergleichende Risikobeurteilung [Faber 2009]. Die Methodik unterscheidet für die Bewertung eine betriebswirtschaftliche und eine volkswirtschaftliche Sicht.

Eine Unterscheidung der beiden Sichtweisen ist bei Kunstbauten in Abhängigkeit der Fragestellung ebenfalls von Bedeutung. Durch Ereignisse können je nach Betrachtungsweise unterschiedliche Konsequenzen auftreten:

- Betriebswirtschaftliche Sicht: Kosten, die der Strassenverwaltung entstehen (primär unmittelbar entstehende Instandsetzungskosten eines Bauwerks).
- Gesellschaftliche Sicht: Kosten, die der Gesellschaft entstehen, insbesondere Personenschäden bei Benutzern.

Indirekte Konsequenzen auf Grund des Ausfalls eines Bauwerks und einem entsprechenden Streckenausfall (Netzrisiken) werden nicht im Rahmen der Methodik für die Risikobeurteilung von Kunstbauten ermittelt. Dazu zählen Betriebs- und Zeitkosten sowie Umweltbelastung (Lärm, CO<sub>2</sub>-Belastung, etc.) durch Umfahrvverkehr. In Abhängigkeit der Fragestellung kann die Ermittlung des Netzrisikos für die Beurteilung eines Einzelobjekts notwendig sein. Die Netzrisiken werden in diesem Fall gemäss der Methodik zur Ermittlung des Netzrisikos [Fernaud 2009] ermittelt.

#### **Monetarisierung der Konsequenzen**

Die Monetarisierung der Konsequenzen dient dazu, die unterschiedlichen Messgrössen einheitlich und vergleichbar darzustellen. Sie dient als Basis für eine Massnahmenoptimierung. Da die grundlegenden Zusammenhänge bei der betriebswirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bewertung gleich sind, wird in der weiteren Erläuterung nicht weiter differenziert (siehe [Faber 2009]).

Die monetarisierten Konsequenzen eines Bauwerksversagens setzen sich aus den Instandsetzungskosten der Bauwerks- und allfälliger Personen- und weiterer Sachschäden zusammen.

Die Höhe der Instandsetzungskosten für ein Einzelobjekt wird in Abhängigkeit der Einwirkung anhand einfacher Überlegungen auf Basis des Wiederbeschaffungswertes abgeschätzt.

Bei den Personenschäden, die unmittelbar durch ein (Teil-)Versagen eines Bauwerks verursacht werden, werden Verletzte und Todesopfer berücksichtigt. Deren Anzahl wird gemäss Ziffer 5.6 in einfacher Form abgeschätzt. Bewertungsansätze können von Grundlagen wie [BFU 2007], [ASTRA 2003] übernommen werden.

Weitere Sachschäden werden ebenfalls gemäss Ziffer 5.6 auf einfache Weise geschätzt. Für Schäden an Fahrzeugen und geladener Ware sind pauschale Ansätze ausreichend.

Die Unsicherheiten bei der Monetarisierung der direkten Konsequenzen werden erfasst, indem diese als Zufallsvariablen mit Mittelwerten und Standardabweichungen abgebildet werden.

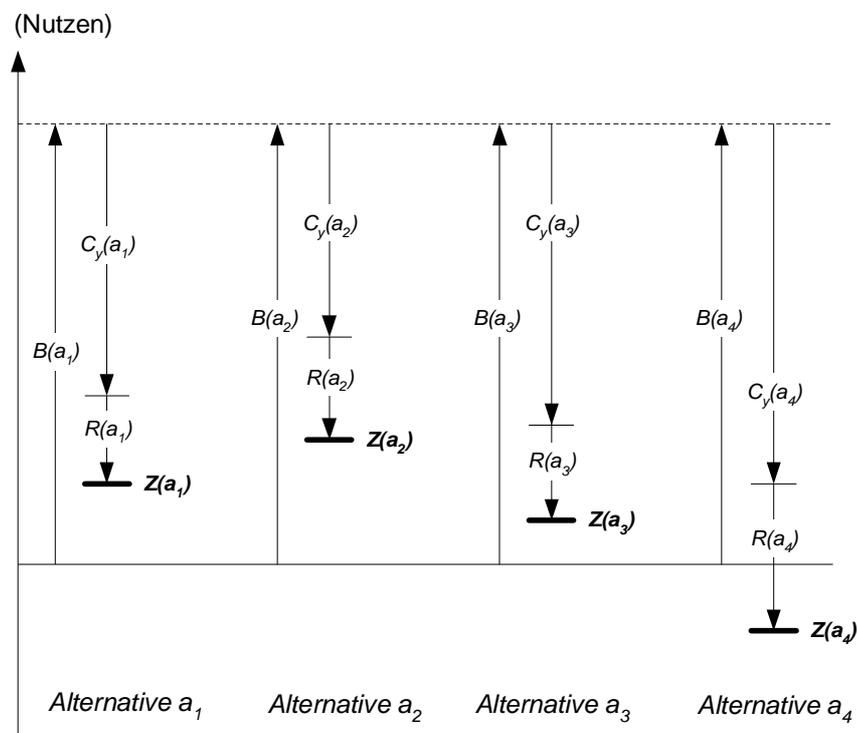
### Entscheidfindung

Für die Entscheidfindung auf der Basis einer betriebswirtschaftlichen oder gesellschaftlichen Optimierung wird die Zielfunktion

$$Z(a) = B(a) - C_y(a) - R(a)$$

maximiert. Die Zielfunktion  $Z(a)$  enthält den Erwartungswert der positiven Wirkung bzw. des Nutzens  $B(a)$ , den Erwartungswert der Massnahmenkosten  $C_y(a)$  und das Risiko in Form des Erwartungswertes der Schadenskosten  $R(a)$ , alle bezogen auf die Handlungsalternative  $a$ . Der Nutzen  $B(a)$  kann in einer umfassenden Weise den Nutzen eines Einzelobjekts enthalten oder nur Nutzenveränderungen von Handlungsalternativen (Massnahmen) gegenüber einem Ausgangszustand darstellen. Ergibt eine Handlungsalternative beispielsweise eine höhere Kapazität gegenüber einem Ausgangszustand, so ist dies als zusätzlicher Nutzen in die Zielfunktion aufzunehmen. Ziel der Optimierung ist es, diejenige Handlungsalternative  $a^*$  aus allen Alternativen  $a$  zu finden, welche die Zielfunktion maximiert.

Gemäss Methodik der vergleichenden Risikobeurteilung [Faber 2009] führt dies zu Abbildung 5, in der Handlungsalternativen  $a$  in Form einzelner Massnahmen aufgeführt sind.



Zielfunktion  $Z(a) = B(a) - C_y(a) - R(a)$   
 $B(a)$  Nutzen der Handlungsalternativen  
 $C_y(a)$  Kosten der Handlungsalternativen  
 $R(a)$  Risiken der Handlungsalternativen

Abbildung 5: Identifikation der optimalen Handlungsalternative

Die Handlungsalternative  $a_2$  ergibt den höchsten Wert für die Zielfunktion. Für die Handlungsalternative  $a_4$  wird der gesamte Nutzen hingegen negativ.

Die Handlungsalternativen können an verschiedenen Stellen ansetzen:

- Reduktion der Häufigkeit von Ausfallszenarien
- Reduktion der unmittelbaren Konsequenzen von Ausfallszenarien

Im Kontext der betriebswirtschaftlichen Optimierung stehen die Reduktion der Häufigkeit von Ausfallszenarien und die Reduktion der Ausfalldauer im Vordergrund.

### **Ermittlung der Kosten von Handlungsalternativen (Massnahmenkosten)**

Unter Massnahmenkosten  $C_y(a)$  fallen neben Investitionskosten ebenfalls periodisch anfallende Unterhalts- und Betriebskosten. Die Kosten der Massnahmen sind auf die gleiche Zeitperiode wie die ermittelten Risiken zu beziehen. Sinnvoll und praktikabel ist eine Umrechnung auf Jahreskosten. Dazu werden Investitionskosten über den gesamten Betrachtungszeitraum diskontiert. Zu diesem Zweck sind folgende Festlegungen oder Abschätzungen erforderlich:

- Lebensdauer einer Massnahme (vorgesehene Einsatzdauer)
- Diskontrate aus gesellschaftlicher Sicht (volkswirtschaftliche Diskontrate)
- Unterhaltskosten. Können näherungsweise als Prozentanteil der Investitionskosten geschätzt werden.
- Betriebskosten (laufend über die Lebensdauer anfallend)

Auf dieser Basis werden die Jahreskosten wie folgt berechnet:

$$C_y(A) = \left( r^n \cdot \frac{r-1}{r^n-1} \cdot C_I(a) \right) + C_{UB}(a); \quad r = 1 + \frac{p}{100}$$

Wobei  $n$  die Lebensdauer und  $p$  der Diskontsatz sind;  $C_I(a)$  sind einmalige Investitionskosten;  $C_{UB}(a)$  sind jährlich anfallende Unterhalts- und Betriebskosten, die zusätzlich aufgrund der Massnahmen entstehen.

Fallen Investitionen für Massnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten an, so sind diese auf den gleichen Zeitpunkt zu diskontieren. Anschliessend können die Jahreskosten wiederum nach obigen Regeln ermittelt werden.

Die Ausführungen zur Risikoermittlung und Massnahmenbewertung gehen nur so weit, wie sie für die Beurteilung von Handlungsalternativen und Risiken erforderlich sind. Die detailliertere Beurteilung von Massnahmen ist im Teilprojekt 104 vertieft beschrieben.

## **6.2 Akzeptanzkriterien**

Die Methodik der vergleichenden Risikobeurteilung [Faber 2009] sieht neben der Optimierung der Handlungsalternativen eine explizite Prüfung anhand von Akzeptanzkriterien vor. Diese können als Rahmenbedingungen in einzelnen Sicherheitsbereichen vorliegen und sind zwingend einzuhalten. Mögliche Kriterien sind:

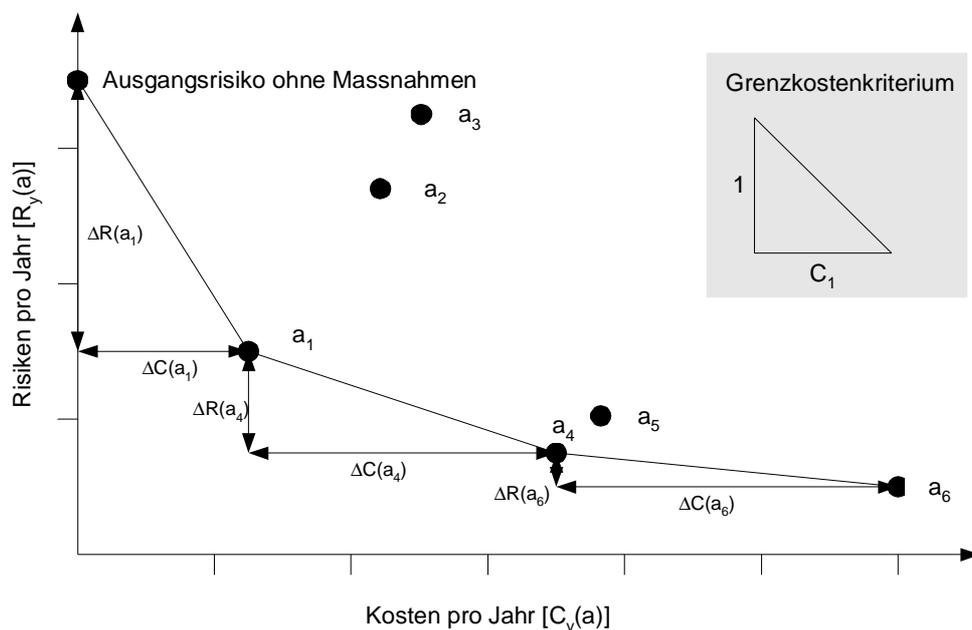
- Grenzwerte für individuelle Todesfallrisiken (Todesfallwahrscheinlichkeit / Jahr)
- Grenzwert für das kollektive Todesfallrisiko (z.B. Akzeptanzlinien in einem Wahrscheinlichkeits-Ausmass-Diagramm gemäss Störfallverordnung)
- Sozio-ökonomische Akzeptanz, ausgedrückt als Grenzkostenkriterium. Die Effizienz einer Handlungsalternative soll kleiner als die Grenzkosten sein.
- Konformität mit weiteren explizit formulierten Rahmenbedingungen.

Für das Gesamtrisiko von Einzelobjekten, ausgedrückt als erwarteter Schaden in CHF/Jahr, werden im Rahmen der Risikobeurteilung von Kunstbauten keine Akzeptanzkriterien im Sinne von einzuhaltenden Grenzwerten festgelegt. Neben der Optimierung der Handlungsalternativen wird jedoch die Akzeptanz von Personenrisiken anhand des Grenzkostenkriteriums geprüft.

Die Personenrisiken sind akzeptabel, wenn nachgewiesen wird, dass sämtliche verhältnismässigen Sicherheitsmassnahmen ergriffen worden sind. Dabei sind folgende Regeln zu beachten:

- Verhältnismässig sind alle Sicherheitsmassnahmen, deren Quotient von Kosten und Wirksamkeit (Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis) unterhalb des Grenzkostenkriteriums liegt. Das heisst, es müssen sämtliche Massnahmen, die unterhalb des Grenzkostenkriteriums liegen, realisiert werden. Liegt das Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis einer Massnahme über dem Grenzkostenkriterium, so ist die Massnahme nicht zu realisieren.
- Für die Risikobeurteilung müssen alle Massnahmen identifiziert und geprüft werden, deren Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis unterhalb des Grenzkostenkriteriums liegen könnte.

Die beschriebenen Aspekte lassen sich anhand *Abbildung 6* erläutern.



*Abbildung 6: Überprüfen der Akzeptanz anhand des Grenzkostenkriteriums*

Abbildung 6 zeigt ein Beispiel, in dem 6 Handlungsalternativen zu prüfen sind:

- Einzelne Massnahmen  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$
- Kombinationen der Einzelmassnahmen  $a_4$ ,  $a_5$ ,  $a_6$

Es wird vorausgesetzt, dass die dargestellten Handlungsalternativen vollständig sind. Auf die Darstellung von Massnahmenkombinationen, die offensichtlich ungünstig zu beurteilen sind, wird jedoch verzichtet (Beispielsweise  $a_2$  mit  $a_3$ ).

Der Ausgangszustand ohne Massnahmen sowie die geprüften Massnahmen und Massnahmenkombinationen sind im Risiko-Kosten-Diagramm von *Abbildung 6* als Punkte eingetragen. Der Ausgangszustand enthält keine zu prüfenden Massnahmen, weshalb auch keine entsprechenden Kosten pro Jahr anfallen.

Lesebeispiel: Die Massnahme  $a_1$  reduziert das Risiko des Ausgangszustandes um  $\Delta R(a_1)$  und führt zu Kosten  $\Delta C(a_1)$ . Das Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis der Massnahme  $a_1$  beträgt  $\Delta C(a_1)/\Delta R(a_1)$ .

Das Grenzkostenkriterium ist dargestellt als Kosten  $C_1$ , die zu einer Reduktion des Risikos um eine Einheit höchstens vorzusehen sind.

Aus Abbildung 6 ergibt sich folgende Beurteilung:

- Das Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis  $\Delta C(a_1)/\Delta R(a_1)$  der Handlungsalternative  $a_1$  liegt unterhalb des Grenzkostenkriteriums:  $a_1$  ist aus Gründen der Akzeptanz von Personenschäden zu realisieren.
- Das Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis  $\Delta C(a_4)/\Delta R(a_4)$  der Handlungsalternative  $a_4$  liegt oberhalb des Grenzkostenkriteriums:  $a_4$  ist aus Gründen der Akzeptanz von Personenschäden nicht mehr zu realisieren. Dies gilt gleichermassen für alle weiteren Einzelmassnahmen und Kombinationen.

## 7 Anwendung der Methodik

### 7.1 Fragestellungen

Die in den vorhergehenden Kapiteln erläuterte Methodik wurde im Rahmen des Projekts „Testregion Risikomethoden“ an zwei Einzelobjekten des Nationalstrassenabschnitts Amsteg – Göschenen angewendet:

- Reussbrücke Intschi [EBP 2008a]
- Steinschlaggalerie Guetli [EBP 2008b]

Das Ziel des Projekts Testregion war es, die verschiedenen Methoden der Risikobeurteilung und ihr Zusammenwirken in der praktischen Anwendung zu testen. Insbesondere sollte eine vergleichende Beurteilung der Risiken aus verschiedenen Sicherheitsbereichen (Naturgefahren, Störfall, Verkehr, Kunstbauten) praktisch durchgeführt und die Machbarkeit aufgezeigt werden.

Im Teilbereich Kunstbauten wurde die Risikobeurteilung für einzelne Objekte auf der Teststrecke und für ausgewählte Gefahren durchgeführt. Das Risiko war zu bestimmen aus der Versagenswahrscheinlichkeit und dem Schadensausmass (Konsequenzen) und in CHF/Jahr für den weiteren Vergleich mit den Sicherheitsbereichen anzugeben.

### 7.2 Vorgehen

In [AGB 2008] wurden nur wenige zu berücksichtigende Einwirkungen festgelegt, die kein vollständiges Bild zum Risiko abgeben. Für die Reussbrücke Intschi sind dies:

- Verkehrslasten, inkl. auf dem Standstreifen stehende Lastwagenkolonne
- Schnee

Für die Steinschlaggalerie Guetli war die Einwirkung Fahrzeuganprall zu berücksichtigen.

Das Risiko der Reussbrücke Intschi wurde beurteilt für eine Kombination der Einwirkungen der vorgenannten Einwirkungen. Das Risiko der Steinschlaggalerie Guetli wurde beurteilt für die Einwirkung Fahrzeuganprall an Aussenstützen der Galerie.

Die Risikobeurteilung der beiden Objekte wurde mit Hilfe der im vorliegenden Teilprojekt entwickelten Methodik durchgeführt. Die Ermittlung des Risikos wurde zur Begrenzung des Aufwands stark vereinfacht und zahlreiche Parameter wurden ohne weitere Vertiefungen angenommen.

Die Wirkung der Massnahmen wurde mit Hilfe angepasster Parameter für die Risikoermittlung abgeschätzt. Die Bewertung der Risiken erfolgt anhand der Effektivität sowie der Effizienz der Massnahmen.

### 7.3 Fazit

Die zwei Einzelobjekte wurden nach Vorgabe [AGB 2008] bezüglich einer stark eingegrenzten Zahl von Einwirkungen sowie je zwei Massnahmen und deren Kombination untersucht. Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen:

- Die Anwendung der Methodik erlaubt Aussagen zum Risiko, wie es im Rahmen des Teilprojekts 102 formuliert ist. Die Anwendung an den zwei Fallbeispielen ergab keine Hinweise auf erforderliche Anpassungen der Methodik.
- Die Ergebnisse entsprechen nicht einem vollständigen Risiko dieser beiden Objekte (nur wenige ausgewählte Einwirkungen). Um ein gesamtes Risiko zu erhalten, müssten zahlreiche weitere Einwirkungen (und deren Kombinationen) berücksichtigt werden.

- Für die Ermittlung des Risikos sind viele Parameter erforderlich, zu denen in zahlreichen Fällen vereinfachend Annahmen getroffen wurden. Komplexe Abhängigkeiten (z.B. Konsequenzen in Abhängigkeit des Versagensmechanismus) wurden stark vereinfacht abgebildet. Die differenzierte Ermittlung sämtlicher erforderlicher Parameter und verfeinerte Abbildung der Abhängigkeiten hätten zu einem deutlich höheren Aufwand geführt.
- Die zu den Parametern getroffenen Annahmen und die vereinfachte Abbildung von Abhängigkeiten haben einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Risikoermittlung (Sensitivität).

Der für die Risikobeurteilung der beiden Einzelobjekte erforderliche Aufwand ist trotz starker Vereinfachungen und zahlreicher Annahmen hoch. Der hohe Aufwand lässt sich vereinfacht zwei Bereichen zuordnen:

- Analyseaufwand, der entsteht, weil die Methodik erstmalig angewendet wird. Bei sich wiederholenden Anwendungen werden erarbeitete Ergebnisse weiter verwendet werden können, so dass die Effizienz in der Bearbeitung steigen wird.
- Analyseaufwand, der für das zu untersuchende Einzelobjekt entsteht (Ermittlung der für die Risikobeurteilung erforderlichen objektspezifischen Kennwerte, qualitative Tragwerksanalyse)

Die im Rahmen der Testregion gemachten Erfahrungen wurden in [EBP 2008c] dokumentiert und sind in den vorliegenden Bericht eingeflossen.

## 8 Folgerungen und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Verschiedene Erkenntnisse sind bereits im Kapitel 7 enthalten. Diese werden mit weiteren Folgerungen an dieser Stelle nochmals zusammengefasst.

#### Allgemeine Zielsetzung:

Die dem Projekt zugrunde gelegte Zielsetzung erwartet von der Methodik des Teilprojekts 108 sowohl objektspezifische als auch netzweite Aussagen. Sie soll zudem wissenschaftlich fundiert, auf einem probabilistischen Ansatz beruhen und in der Praxis anwendbar sein.

Die im Teilprojekt 108 beschriebene Methodik erfüllt grundsätzlich diese Anforderungen. Sie kann sowohl objektspezifisch als auch netzweit angewendet werden. Die offene Formulierung der Methodik lässt Spielraum in der Anwendung offen, um das sehr breit formulierte Ziel erreichen zu können. Die in der allgemeinen Zielsetzung des Projektes geforderte Universalität führt jedoch dazu, dass einzelne spezifische Ziele und Anforderungen an die Methodik nur teilweise erfüllbar sind (siehe Ziffer 8.2).

#### Umsetzung des Teilprojekts 102 bei Kunstbauten:

Das Teilprojekt 102 beschreibt eine breite Palette von Instrumenten für die Risikoermittlung, die einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad und entsprechenden Analyseaufwand erfordern. Es ist ausser Zweifel, dass die Methodik grundsätzlich auch an Kunstbauten anwendbar ist. Würde die Methodik des Teilprojektes 102 allerdings vollständig und ohne Abstriche umgesetzt (vollständig probabilistische Modellierung unter Berücksichtigung von allen Abhängigkeiten und Unsicherheiten), dann ist die Umsetzung dieser Methodik äusserst aufwändig und anspruchsvoll. Das Beispiel der Testregion zeigt, dass eine Anwendung mit Vereinfachungen möglich ist, die jedoch Zugeständnisse in der Aussagekraft der Ergebnisse erfordern.

Die Methodik des Teilprojekts 108 weist Überschneidungen mit den Teilprojekten 104 „Effektivität und Effizienz von Massnahmen“ und 109 „Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten“ auf, da sie (wie auch die Methodik des Teilprojekts 102) für die Risikobewertung die Prüfung von Massnahmen erfordert. Letztere wird jedoch erst bzw. nochmals in den Teilprojekten 104 bzw. 109 definiert. Die Trennung von Risikobeurteilung und Massnahmenbeurteilung erweist sich bei der Entwicklung der Methodik der Risikobeurteilung für die Kunstbauten als nicht zweckmässig.

#### Selektion:

Es besteht eine grosse Anzahl verschiedenster Kunstbauten und Einwirkungen. Um den Analyseaufwand für Systeme einzugrenzen, muss auf risikorelevante Objekte und Fragestellungen fokussiert werden. Zu diesem Zweck wurde der Schritt der Selektion eingeführt. Die Selektion (siehe Ziffer 4.2) ist ein geeignetes Vorgehen zur Eingrenzung und Fokussierung auf risikorelevante Aspekte. Die Risikobetrachtung kann dann auf die selektionierten Parameter konzentriert erfolgen. Dieser Ansatz bedarf jedoch der weiteren Entwicklung bzw. Forschung (siehe Ziffer 8.4).

#### Grobanalyse:

Die Methodik des Teilprojekts 108 stellt einen vereinfachten Ansatz der Methodik des Teilprojekts 102 dar. Dennoch ist die Umsetzung der Methodik vergleichsweise aufwändig (siehe Beispiel Testregion). Weitere Vereinfachungen sind jedoch immer mit einem Verlust an Aussagekraft zu spezifischen Fragestellungen verbunden.

Die Methodik des Teilprojekts 108 zielt auf eine Detaillierungsebene ab, die einerseits eine Risikobeurteilung in ausreichender Detaillierung ermöglicht. Andererseits lässt der erforderliche Aufwand die Anwendung der Methodik auch auf eine grössere Population von Kunstbauten zu.

Ein hoher Detaillierungsgrad bei der Umsetzung der Methodik des Teilprojekts 108 ist gerechtfertigt bei Fragestellungen zu Einzelobjekten und bei Fragen zur Risikoakzeptanz. Bei Anwendungen auf grosse Populationen führt er jedoch zu einem unverhältnismässig hohen Aufwand.

Ein möglicher Ansatzpunkt zum Vorgehen ist daher:

- Für den Zweck netzweiter Betrachtungen sollte der Detaillierungsgrad der Risikobeurteilung niedrig gehalten werden. Die Risikobeurteilung erfolgt für Kunstbautentypen, nicht für Einzelobjekte. Die Methodik ist weiter zu standardisieren (siehe Ziffer 8.4).
- Für den Zweck der objektspezifischen Risikobeurteilung (Massnahmenprüfung für ein Einzelobjekt, Beurteilung der Risikoakzeptanz) ist ein hoher Detaillierungsgrad der Risikobeurteilung zu wählen. Sollte dies nicht ausreichen, ist eine Detailanalyse durchzuführen.

#### Detailanalyse:

Eine Detailanalyse wird ausschliesslich bei objektspezifischen Betrachtungen (Beurteilung der Risikoakzeptanz, Massnahmen) durchgeführt.

## **8.2 Vergleich mit den Zielen und Anforderungen an die Methodik**

### **8.2.1 Ziele und Anforderungen**

Die Ziele und Anforderungen sind in Ziffer 2.2 beschrieben und nachfolgend stichwortartig zusammengefasst.

Anwendung auf Populationen:

- Übersicht und Vergleich der Risiken ausgewählter Kunstbautentypen, Einwirkungen oder Regionen ermöglichen.
- Vergleich und Priorisierung der Risiken innerhalb ausgewählter Kunstbautentypen Einwirkungen, Tragwerksteile, andere definierte Parameter.
- Ermittlung spezifischer Schwachstellen von Kunstbautentypen (Risikoschwerpunkte innerhalb eines Kunstbautentyps)
- Priorisierung und Optimierung netzweit wirkender Massnahmen zur Reduktion der Risiken im Gesamtnetz (generelle Massnahmen beurteilen können)
- Ermittlung des Stellenwerts der Risiken der Kunstbauten gegenüber anderen Risiken (Risikovergleich ermöglichen)

Anwendung auf Einzelobjekte:

- Risikoermittlung am Einzelobjekt für alle oder ausgewählte Einwirkungen, Tragwerksteile, etc.
- Massnahmenbeurteilung und Vergleich von Massnahmenvarianten bei einem Einzelobjekt
- Massnahmenpriorisierung und Rangierungen von Einzelobjekten innerhalb beschränkter Objektinventare
- Beurteilung der Akzeptanz von Risiken am Einzelobjekt

## 8.2.2 Anwendung der Methodik auf Populationen

Die entwickelte Methodik kann auf Stufe Grobanalyse für verschiedene Fragestellungen bei Populationen von Kunstbauten angewendet werden. Tabelle 8 fasst die Anwendung für diese Fragestellungen zusammen.

Um den Analyseaufwand für grosse Populationen einzugrenzen, soll auf risikorelevante Objekte und Fragestellungen fokussiert werden. Zu diesem Zweck wurde der Schritt der Selektion eingeführt. Die folgenden Aussagen beziehen sich auf die herausgefilterten Kunstbauten, gelten sinngemäss jedoch auch für das Gesamtinventar der Kunstbauten.

Ziele und Anforderungen	Beurteilung
Übersicht und Vergleich der Risiken a) ausgewählter Kunstbautentypen	Die Angabe einer Risikoverteilung im Strassennetz ausgewiesen nach Kunstbautentypen ist möglich mittels: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Risikoermittlung für sämtliche Objekte (hoher Aufwand!)</li> <li>▪ Typisierung der Objekte und Risikoermittlung für Repräsentanten des definierten Typs; Hochrechnung auf die Population</li> </ul>
b) ausgewählter Einwirkungen	Die Ermittlung erfordert analog den Kunstbautentypen ein Vorgehen auf Ebene der Einzelobjekte oder von Objekttypen. In Abhängigkeit der interessierenden Fragestellung ist zu unterscheiden nach: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Summe der Risiken sämtlich möglicher Einwirkungen</li> <li>▪ Summe der Risiken einzelner Einwirkungen und Einwirkungskombinationen</li> <li>▪ Risiko der als massgebend definierten Einwirkung bzw. Einwirkungskombination</li> </ul> Die Eingrenzung der interessierenden Einwirkungen erfolgt anhand der Selektion. Eine netzweite Darstellung der selektionierten Risiken nach Einwirkungen ist möglich, wenn die Risiken aller Einzelobjekte auf die gleiche Art ermittelt werden (sämtliche Einwirkungen, einzelne Einwirkungen und Einwirkungskombinationen, massgebende Einwirkung bzw. Einwirkungskombination).
c) ausgewählter Regionen	Die Angabe einer Risikoverteilung ausgewiesen nach Regionen ist in beliebiger Detaillierung möglich, sofern Risiken für Einzelobjekte oder Objekttypen nach einer der vorangehenden Fragestellungen ermittelt wurden.
Vergleich und Priorisierung der Risiken innerhalb der Kunstbautentypen	Wird die Risikoermittlung für sämtliche Einzelobjekte eines Kunstbautentyps durchgeführt (und nicht nur für stellvertretende Einzelobjekte), lassen sich die Einzelobjekte innerhalb eines Kunstbautentyps nach ihrem Risiko priorisieren.
Ermittlung spezifischer Schwachstellen von Kunstbautentypen	Die Kriterien für die Selektion fokussieren auf mögliche risikomässige Schwachstellen. Wird bezogen auf die selektierten Schwachstellen eine Risikoermittlung durchgeführt, kann der risikomässige Stellenwert der Schwachstellen aufgezeigt werden.
Priorisierung und Optimierung netzweit wirkender Massnahmen zur Reduktion der Risiken im Gesamtnetz	Die Darstellung und Reihung von Objekten nach Risiken erlaubt es, Ansatzpunkte für generelle Massnahmen zu identifizieren. Für eine Priorisierung und Optimierung von Massnahmen im Netz sind diese entweder objektweise zu beurteilen oder bezogen auf Objekttypen in allgemeinerer Form zu behandeln. Eine objektweise Beurteilung ist für eine netzweite Betrachtung ausserordentlich aufwändig und nicht angebracht. Werden Massnahmen für Objekttypen beurteilt, kann dies nur in grober Form geschehen.

Ziele und Anforderungen	Beurteilung
Ermittlung des Stellenwerts der Risiken der Kunstbauten gegenüber anderen Risiken im Verkehrssystem Strasse	<p>Die für Einzelobjekte ermittelten Risiken können anderen Risiken im Verkehrssystem Strasse gegenübergestellt werden, da die Darstellung der Risiken einheitlich in CHF/Jahr erfolgt.</p> <p>Dazu ist die Risikoermittlung durchzuführen entweder für sämtliche Einzelobjekte oder vereinfachend nur für stellvertretende Objekte (Objekttyp), mit anschliessender Hochrechnung auf das Gesamtinventar.</p> <p>Bei einem Risikovergleich ist darauf zu achten, dass vollständige Risikobilder miteinander verglichen werden (beispielsweise das Risiko für alle das Risiko massgeblich beeinflussenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen).</p>

*Tabelle 8: Möglichkeiten und Grenzen der erarbeiteten Methodik, Anwendung auf Populationen*

### 8.2.3 Anwendung der Methodik auf Einzelobjekte

Anhand der Erläuterungen in Ziffer 8.2.2 wird deutlich, dass auch Betrachtungen ganzer Populationen letztlich an Einzelobjekten bzw. an Repräsentanten eines definierten Typs erfolgen. Tabelle 9 fasst die Anwendung auf Einzelobjekte zusammen.

Ziele und Anforderungen	Beurteilung
Risikoermittlung für Einzelobjekte	<p>Der Detaillierungsgrad der Risikoermittlung weist eine grosse Bandbreite auf (detaillierte bis vereinfachte Risikoermittlung).</p> <p>Gemäss der Methodik des Teilprojekts 108 beruht die Risikoermittlung auf einer Gegenüberstellung des aktualisierten Widerstands eines Bauwerks resp. eines Tragwerks-teils und der aktualisierten Einwirkungen.</p> <p>Hierzu sind in der Regel sowohl heutige Normen als auch die Normen, nach denen ein Bauwerk bemessen wurde, beizuziehen. Zu beachten ist, dass die diversen Normen – auch heutige – kein einheitliches Sicherheitsniveau aufweisen.</p>
Massnahmenbeurteilung und Vergleich von Massnahmenvarianten	<p>Für Einzelobjekte ist eine Massnahmenbeurteilung auf der Basis einer Grobanalyse grundsätzlich möglich (die Fragestellung ist für den Detaillierungsgrad massgebend). Reicht die Grobanalyse nicht aus, um eine aussagekräftige Beurteilung zu erlangen, ist eine vertiefte Analyse erforderlich.</p> <p>Die Durchführung der Massnahmenbeurteilung ist in den Teilprojekten 104 „Effektivität und Effizienz von Massnahmen“ und 109 „Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten“ definiert.</p>
Massnahmenpriorisierung und Rangierungen von Einzelobjekten innerhalb beschränkter Objektinventare	<p>Die objektspezifische Analyse erlaubt es, Massnahmenvarianten für zahlenmässig beschränkte Objektinventare zu untersuchen.</p> <p>Es gilt die gleiche Beurteilung wie für die Risikoermittlung für Einzelobjekte und die Massnahmenbeurteilung.</p>
Beurteilung der Akzeptanz von Risiken	<p>An die Beurteilung der Akzeptanz von Risiken stellen sich im Allgemeinen Anforderungen, die eine vertiefte Risikoermittlung notwendig machen. Aber auch hier ist letztlich die Fragestellung massgebend.</p>

*Tabelle 9: Möglichkeiten und Grenzen der erarbeiteten Methodik, Anwendung auf Einzelobjekte*

## 8.3 Folgerungen

Aus der Beschreibung der im Teilprojekt 108 erarbeiteten Methodik (Kapitel 5 und 6), ihrer Anwendung an Fallbeispielen (Kapitel 7) und dem Vergleich mit den Anforderungen (Ziffern 8.2.2 und 8.2.3) können diverse Folgerungen abgeleitet werden:

- Die Anwendung der vorliegenden Methodik erlaubt Aussagen zum Risiko, wie es im Rahmen des Teilprojekts 102 definiert ist. Damit werden Risiken aus Kunstbauten vergleichbar mit Risiken aus andern Sicherheitsbereichen. Die Ergebnisse der durchgeführten Fallbeispiele erscheinen – unter Berücksichtigung der Fragestellung und des betriebenen Analyseaufwandes – plausibel.
- Die entwickelte Methodik des Teilprojekts 108 lässt grossen Spielraum offen bezüglich Detaillierungsgrad der Analyse und dem damit verbundenen Analyseaufwand. Dieser Spielraum ist zwingend erforderlich, um je nach Fragestellung eine adäquate Aussage zu ermöglichen (ausreichende Aussagekraft mit vertretbarem Analyseaufwand). Sollen Risiken ganzer Populationen dargestellt werden, kann die Risikobeurteilung in vereinfachter Form durchgeführt werden. Soll hingegen eine detaillierte Analyse der Risiken und Beurteilung von Massnahmen an einem einzelnen Objekt erfolgen, kann ein höherer Detaillierungsgrad mit weniger Vereinfachungen und Annahmen angemessen sein.

Es ist daher nicht sinnvoll, die Methodik für die Risikobeurteilung von Kunstbauten zu eng zu definieren.

- Unabhängig vom gewählten Detaillierungsgrad für die Risikoermittlung setzt die Methodik Fachwissen und Erfahrung in der Durchführung von Risikoermittlungen und der probabilistischen Modellierung von Einwirkungen und Tragwerksystemen voraus. Auch bei umfassender Umsetzung der Methodik ist davon auszugehen, dass der Anwenderkreis der Methodik stark eingeschränkt bleibt.
- Die Beschreibung der vorliegenden Methodik fokussiert auf die Stufe der Grobanalyse. Auf dieser Stufe ist der grösste Bedarf, effizient zu Risikoergebnissen zu kommen. Die Stufe der Detailanalyse kann sich stärker auf bereits etablierte Ansätze der probabilistischen Modellierung und Bemessung abstützen.
- Der Methodik auf der Stufe der Grobanalyse liegen einige stark vereinfachende Annahmen zugrunde (z.B. optimale, d.h. fehlerfrei und ohne Tragreserven durchgeführte Bemessung und Erstellung der Kunstbauten). Wird dies als nicht angemessen erachtet, muss auf die Stufe der Detailanalyse gegangen werden.

Dies gilt gleichermassen für die Bestimmung der relevanten Parameter, die für die Risikoermittlung benötigt werden. Sind die Annahmen für die Beantwortung der Fragestellung nicht angemessen, müssen ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung solcher Parameter durchgeführt werden. In diesem Punkt besteht Entwicklungs- und Forschungsbedarf, sodass mit zunehmender Anzahl durchgeführter Risikoermittlungen auf Erfahrungswerte abgestimmt werden kann.

Vergleiche von Ergebnissen von Grobanalysen und Detailanalysen sind anzustreben, um die Aussagekraft der Resultate resp. den maximal zulässigen Umfang an Vereinfachungen besser einschätzen zu können (Verifizierung).

Die Beurteilung der Praxistauglichkeit umfasst mehrere Aspekte:

1. Die Methodik soll Antworten auf die interessierenden Fragestellungen ermöglichen.

Die Methodik des Teilprojekts 108 lässt genügend Spielraum, um auf differenzierte Fragestellungen einzugehen (vergleiche Ziffern 8.2.2, 8.2.3 und die vorangehenden Folgerungen). Risikoermittlung und Massnahmenbeurteilung sind auf der Basis einer Grobanalyse möglich. Vertiefte Betrachtungen und detaillierte Massnahmenbeurteilung sind dagegen Gegenstand einer Detailanalyse.

2. Der Analyseaufwand, der erforderlich ist, um nutzbare Aussagen zu erhalten, soll in einem vertretbaren Verhältnis zum Nutzen stehen.

Eine vollständige Aussage zum Risiko einer Population oder eine umfassende Beurteilung und Optimierung von Massnahmen an einem einzelnen Objekt mit Hilfe der Methodik des Teilprojekts 108 ist aufwändig. Der für die Risikobeurteilung erforderliche Aufwand lässt sich vereinfacht zwei Bereichen zuordnen:

- Analyseaufwand, der entsteht, wenn die Methodik erstmalig angewendet wird. Bei sich wiederholenden Anwendungen werden erarbeitete Ergebnisse weiter verwendet werden können, so dass die Effizienz in der Bearbeitung steigen wird.
- Analyseaufwand, der für das zu untersuchende Einzelobjekt entsteht (Ermittlung der für die Risikobeurteilung erforderlichen objektspezifischen Kennwerte, qualitative Tragwerksanalyse)

Angesichts der grossen Anzahl an Kunstbauten, der sehr unterschiedlichen Typen und der grossen Zahl möglicher Einwirkungen und Einwirkungskombinationen wird es einen erheblichen Aufwand erfordern, über die Aggregation der Resultate zu Einzelobjekten fundierte Aussagen über das Gesamtnetz zu erlangen. Eine Eingrenzung der Fragestellung mittels einer möglichst engen Selektion ist unumgänglich.

Der hohe Aufwand einer Risikobeurteilung nach der Methodik des Teilprojekts 108 ist insbesondere in Fällen gerechtfertigt, in denen Populationen oder Einzelobjekte ein potentiell hohes Risiko aufweisen oder über die Verwendung hoher Sicherheitsinvestitionen zu entscheiden ist.

Letztlich bleibt die Einschätzung, dass eine Aggregation von Risiken von Einzelobjekten auf eine Population äusserst aufwändig ist.

3. Die Umsetzung der Methodik soll einer grösseren Zahl von Anwendern möglich sein, wenn das erforderliche Wissen und die benötigten Instrumente vorhanden sind.

Das breite Spektrum von Kunstbauten und die Zahl unterschiedlicher Fragestellungen erfordern – wie ausgeführt – eine Methodik, die Spielraum offen lässt. Der Umgang damit ist anspruchsvoll und bedingt zum einen fundierte Kenntnisse zu Fragen der Risikobeurteilung nach der Methodik des Teilprojekts 102 voraus. Zum anderen ist Fachwissen in der probabilistischen Modellierung von Einwirkungen und Tragwerkssysteme notwendig. Beides zusammen grenzt den Anwenderkreis stark ein.

Um einen breiten Anwenderkreis anzusprechen, sind weitere Standardisierungen mit entsprechender Eingrenzung auf spezifische Fragestellungen notwendig. Ansatzweise sind solche Eingrenzungen vorhanden (beispielsweise auf das Thema "Felssturz auf Galerie").

4. Die Resultate sollen reproduzierbar und bei unterschiedlichen Anwendungen vergleichbar sein.

Je offener die Methodik gehalten ist, um die verschiedenen Fragestellungen angemessen abdecken zu können, desto weniger reproduzierbar sind die Ergebnisse (reproduzierbar im Sinne, dass verschiedene Anwender auf das gleiche Ergebnis kommen). Auch hier gilt die Folgerung, dass starke Eingrenzungen der Fragestellungen und standardisierte Methoden erforderlich sind, wenn die Reproduzierbarkeit erhöht werden soll. Diese sind im Vorfeld einer breiten Anwendung der Methodik des Teilprojekts 108 erst noch vorzunehmen.

## 8.4 Offene Fragen und Forschungsbedarf

### Selektion:

- Die Selektionskriterien stehen für Ausprägungen („Schwachstellen“) der Kunstbauten sowie für Einwirkungen, die zu einem substantiellen Risiko führen können. In zahlreichen Fällen führt erst die Kombination solcher bauwerkseitigen Aspekte, gegebenenfalls verbunden mit einer spezifischen Einwirkung, zu einem massgeblichen Risiko. Es ist zweckmässig, eine systematische Übersicht über die Selektionskriterien im Rahmen eines qualitativen Beurteilungsprozesses von einem Gremium erfahrener Fachleute zu erstellen:
  - Identifizieren risikorelevanter Schwachstellen bei Kunstbauten
  - Festlegen risikorelevanter Einwirkungen

Ziel dieses Prozesses ist es, dass zukünftige Risikoermittlungen auf die massgeblichen Schwachstellen konzentriert werden können und nach und nach für diese Schwachstellen standardisierte Methoden entwickelt werden.

### Grobanalyse:

- Die Eingrenzung des Aufwands, die Vereinfachung der Anwendung und die Anforderung, Resultate reproduzierbar zu machen, erfordern Vereinfachungen, Annahmen und Standardisierungen einzelner Bereiche der Methodik des Teilprojekts 108.

Um trotzdem differenzierte Aussagen zu ermöglichen, ist es ausgehend von der beschriebenen Selektion erforderlich, für massgebliche und eng eingegrenzte Fragestellungen Methoden für die Risikoermittlung zu entwickeln. Für das Beispiel der Galerie könnten dies folgende, eingegrenzte Themen sein: "Felssturz auf Galerie", "Anprall an Stütze".

- Da die Entwicklung entsprechender anwenderbezogener Methoden zeitaufwändig ist und trotzdem nicht alle Fragestellungen damit abgedeckt werden können, ist es sinnvoll, die bestehende Methodik gemäss Teilprojekt 108 anzuwenden, Erfahrungen zu sammeln und zu verifizieren.
- Für zahlreiche Parameter der Risikoermittlung wurden in bisherigen Fallbeispielen Annahmen getroffen. Es ist angebracht, Annahmen, die in verschiedenen Risikobeurteilungen getroffen werden, systematisch zusammenzustellen. Entsprechende Annahmen sollten durch Literaturstudien, vertiefte Untersuchungen oder abgestützte Schätzungen gefestigt werden. Damit wird sichergestellt, dass alle künftigen Anwender auf der gleichen fundierten Basis arbeiten.
- Im Rahmen der Methodik des Teilprojekts 108 sind in der Regel sowohl heutige Normen als auch die Normen, nach denen ein Bauwerk bemessen wurde, beizuziehen. Zahlreiche Normen – auch heutige – weisen jedoch unterschiedliche Sicherheitsniveaus auf. In Form einer Literaturstudie und (vermutlich umfangreicher) Parameterstudien sind Grundlagen zu schaffen, anhand welcher die Unterschiede in den Sicherheitsniveaus der verschiedenen Normen quantitativ erfasst werden können.

## 9 Literaturverzeichnis

- [AGB 2006a] Bundesamt für Strassen (ASTRA), Forschungspaket AGB1, *Teilprojekt AGB2005/108 Vergleichende Risikobeurteilung für Kunstbauten – Pflichtenheft*, Version 3.0, Bern, Januar 2006
- [AGB 2006b] ASTRA, Forschungspaket AGB1, *Voranalyse*, Bern, Januar 2006
- [AGB 2009] ASTRA, Forschungspaket AGB1, *Forschungspaket AGB1 - Projektbeschreibung*, Version 2.2, Bern, April 2009
- [AGB 2008] Forschungspaket AGB1, Testregion Risikomethoden, *Pflichtenhefte Teilbereiche (Vergleichende Risikobeurteilung, Naturgefahren, Störfälle, Kunstbauten, Verkehrsgeschehen, Netzsicherheit)*, Bern, 2008
- [ASTRA 2002] ASTRA, *Berücksichtigung des Unterhalts bei der Projektierung und beim Bau der Nationalstrassen*, Richtlinie, Bern, 2002
- [ASTRA 2003] ASTRA, *NISTRA: Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte*, Methodenbericht, Bern, 2003
- [ASTRA 2004] ASTRA, *Richtlinie für die Datenerfassung der Kunstbauten der Nationalstrassen in KUBA*, Fachdokumentation, Bern, 2004
- [ASTRA 2005a] ASTRA, Abteilung Strassennetze, *Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen*, Richtlinie, Bern, 2005
- [ASTRA 2005b] ASTRA, Abteilung Strassennetze, *Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen*, Richtlinie, Bern, 2005
- [ASTRA 2005c] ASTRA, Abteilung Strassennetze, *Beurteilung der Erdbebensicherheit bestehender Strassenbrücken*, Dokumentation, Bern, 2005
- [ASTRA 2005d] ASTRA, Abteilung Strassennetze, *Anprall von Strassenfahrzeugen auf Bauwerksteile von Kunstbauten*, Richtlinie, Bern, 2005
- [ASTRA 2006] ASTRA (Herausgeber), *Überprüfung bestehender Strassenbrücken mit aktualisierten Strassenlasten*, Dokumentation, Bern, 2006
- [ASTRA 2007a] ASTRA, Abteilung Strassennetze, *Einwirkungen infolge Lawinen auf Schutzgalerien*, Richtlinie, Bern, 2007
- [ASTRA 2007b] ASTRA, Abteilung Strassennetze, *Umnutzung von Standstreifen zu Fahrstreifen*, Richtlinie, Bern, 2007
- [ASTRA 2008] ASTRA, Abteilung Strassennetze, *Einwirkungen infolge Steinschlags auf Schutzgalerien*, Richtlinie, Bern, 2008
- [BFU 2007] Beratungsstelle für Unfallverhütung (BFU), *Volkswirtschaftliche Kosten der Strassenverkehrsunfälle*, Bern, 2007
- [BRP 1997a] Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (BUWAL), *Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten*, Empfehlungen, Bern, 1997
- [BRP 1997b] BRP, BWW, BUWAL, *Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten*, Empfehlungen, Bern, 1997

- [BUWAL 1998] BUWAL, *Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren*, Umweltmaterialien Nr. 85, Bern, 1998
- [EBP 2008a] Ernst Basler + Partner AG, *Vergleichende Risikobeurteilung für Kunstbauten – Risikobeurteilung Reussbrücke Intschi*, Forschungsauftrag AGB 2008/201, Zollikon, 2008
- [EBP 2008b] Ernst Basler + Partner AG, *Vergleichende Risikobeurteilung für Kunstbauten – Risikobeurteilung Steinschlaggalerie Guetli*, Forschungsauftrag AGB 2008/201, Zollikon, 2008
- [EBP 2008c] Ernst Basler + Partner AG, *Testregion Risikomethoden, Erfahrungsbericht Teilbereich Kunstbauten*, Forschungsauftrag AGB1 2008/201, Zollikon, 2008
- [Faber 2002] Faber, M. H. et. al., *Preliminary Assessment of the Draft Swisscodes (SIA 260)*, Zürich, Juli 2002
- [Faber 2009] Faber, M. H. et. al., *Forschungsauftrag AGB2005/102 Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung*, Bericht 618, VSS Zürich, 2009
- [Fermaud 2009] Fermaud, C., *Forschungsauftrag AGB2005/103 Ermittlung des Netzrisikos*, Bericht 619, VSS Zürich, 2009
- [JCSS 2001] Joint Committee on Structural Safety (JCSS), *Probabilistic Model Code*, Zürich, 2001
- [Schubert 2008] Schubert, M., Faber, M. H., *Forschungsauftrag AGB 2002/020 Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten*, Bericht 616, VSS Zürich, 2008
- [SIA 197] SIA, Norm SIA 197:2004, *Projektierung Tunnel - Grundlagen*, Schweizer Norm, Zürich, 2004
- [SIA 197/2] SIA, Norm SIA 197/2:2004, *Projektierung Tunnel - Strassentunnel*, Schweizer Norm, Zürich, 2004
- [SIA 260] SIA, Norm SIA 260:2003, *Grundlagen der Projektierung von Tragwerken*, Schweizer Norm, Zürich, 2003
- [SIA 261] SIA, Norm SIA 261:2003, *Einwirkungen auf Tragwerke*, Schweizer Norm, Zürich, 2003
- [SIA 261/1] SIA, Norm SIA 261/1:2003, *Einwirkungen auf Tragwerke – Ergänzende Festlegungen*, Schweizer Norm, Zürich, 2003
- [SIA 262] SIA, Norm SIA 262:2003, *Betonbau*, Schweizer Norm, Zürich, 2003
- [SIA 263] SIA, Norm SIA 263:2003, *Stahlbau*, Schweizer Norm, Zürich, 2003
- [SIA 267] SIA, Norm SIA 267:2003, *Geotechnik*, Schweizer Norm, Zürich, 2003
- [SIA 269] SIA, Norm SIA 269, *Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken*, Schweizer Norm (in Erarbeitung), Zürich
- [SIA 462] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Richtlinie SIA 462, *Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke*, Schweizer Norm, Zürich, 1994

- [SIA 469] SIA, Norm SIA 469, *Erhaltung von Bauwerken*, Schweizer Norm, Zürich, 1997
- [Spaethe 1992] Spaethe, G.: *Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen*, Springer-Verlag, Berlin, 1992
- [SR 814.012] SR 814.012, *Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung)*, Bundesgesetz, 1991
- [Turkstra 1972] Turkstra, C. J.: *Theory of Structural Design Decisions*, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Kanada, 1972
- [Vogel 2009] Vogel, Th. et. al.: *Forschungsauftrag AGB2005/107 Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten*, Bericht 623, VSS Zürich, 2009
- [VSS 640 320a] Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Norm 640 320a, *Dimensionierung - Äquivalente Verkehrslast*, Schweizer Norm, Zürich, 2000

## Abkürzungen

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
AGB	Arbeitsgruppe Brückenforschung
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
UVEK	Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
TP	Teilprojekt im Rahmen des Forschungspakets AGB1

# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

ARAMIS SBT

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 15.06.2009

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: AGB 2005/108

Projekttitel: Forschungspaket AGB1: Sicherheit des Verkehrssystems Strasse u. dessen Kunstbauten:  
**Risikobeurteilung für Kunstbauten**

Enddatum: 05.05.2009

#### Projektleiter

Name: Fermaud Vorname: Charles

Amt, Firma, Institut: Ernst Basler + Partner AG

Strasse, Nr.: Zollikerstrasse 65

PLZ: 8702 Email: charles.fermaud@ebp.ch

Ort: Zollikon Telefon: +41 44 395 11 11

Kanton, Land: Zürich, Schweiz Fax: +41 44 395 12 34

#### Texte:

Zusammenfassung der Projektergebnisse:  
Die in AGB 2005/108 erarbeitete Methodik der Risikobeurteilung für Kunstbauten baut auf der in AGB 2005/102 entwickelten Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung über das gesamte Verkehrssystem Strasse auf. Die Methodik ermöglicht sowohl die Behandlung ganzer Populationen von Kunstbauten als auch die Betrachtung von Einzelobjekten.  
Die Beurteilung einer Kunstbautenpopulation wird stufenweise durchgeführt. In der ersten Stufe werden aufgrund von Selektionskriterien risikorelevante Objekte oder Objektgruppen herausgefiltert. An diesen Objekten oder ‚stellvertretenden‘ Objekten wird in der zweiten Stufe eine Grobanalyse durchgeführt. Daraus ergibt sich eine Grobbeurteilung der Population.  
Für Einzelobjekte kann eine umfassende Risikoanalyse durchgeführt werden. Die Risiken werden hier unter Berücksichtigung detaillierter objektspezifischer Eigenheiten auf Einwirkungs- und Bauwerksseite differenziert beurteilt. Der Detaillierungsgrad einer solchen Risikobeurteilung führt zu einem entsprechend hohen Aufwand für die Risikoanalyse. Die Detailanalyse wurde im Rahmen von AGB 2005/108 nicht weiter behandelt.  
Die Methodik wurde im Rahmen von AGB 2008/201 (Testregion – Methoden zur Risikobeurteilung) an zwei Einzelobjekten des Nationalstrassenabschnitts Amsteg – Göschenen angewendet.



Zielerreichung:

Die Projektziele:

- *Risikobeurteilung für ausgewählte Kunstbauten*
  - *Validierung der Methode von AGB 2005/102 am Beispiel der Kunstbauten*
- wurden erreicht.

Folgerungen und Empfehlungen:

Das Projekt zeigt deutlich das Spannungsfeld zwischen exakter, detaillierter Analyse eines Einzelobjektes und der Anwendung in grossen Populationen. Auch wenn die Methodik grundsätzlich für beide Fragestellungen anwendbar ist, werden Grenzen entweder in der Qualität der Aussagen beim Einzelobjekt oder beim Bearbeitungsaufwand in einer grossen Population sichtbar.

Publikationen:

Stenger F. et al., 2009, Forschungspaket AGB1, Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten, Risikobeurteilung für Kunstbauten, Forschungsauftrag AGB 2005/108 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bericht Nr. 624, VSS Zürich.



**Beurteilung der Begleitkommission:**

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:	Die vorgeschlagene Methodik ist als Entwurf zu betrachten. Sie wurde an wenigen Fallbeispielen für Einzelobjekte praktisch geprüft. Die Eignung für die Beurteilung grösserer Bestände von Kunstbauten, die für die Strassenverwaltungen von besonderer Bedeutung ist, konnte nicht validiert werden. Die Praxis-tauglichkeit der vorgeschlagenen Methode ist noch nicht erbracht.
Umsetzung:	Die Umsetzung der Methode für Populationen anhand der Selektion und von Grobanalysen kann grossen Nutzen bringen und sollte deshalb möglichst umgehend praktisch angewendet und erprobt werden. Die Detailanalyse von Einzelobjekten ist anspruchsvoll und bedingt zum einen fundierte Kenntnisse zu Fragen der Risikobeurteilung nach der Methodik von AGB 2005/102. Zum anderen ist Fachwissen in der probabilistischen Modellierung von Einwirkungen und Tragwerkssysteme notwendig. Es gilt durch Anwenden der Methodik Erfahrung zu sammeln.
weitergehender Forschungsbedarf:	Es ist eine systematische Übersicht über die Selektionskriterien im Rahmen eines qualitativen Beurteilungsprozesses von einem Gremium erfahrener Fachleute zu erstellen.
Einfluss auf Normenwerk:	Kein Einfluss auf Normenwerk.

**Präsident Begleitkommission:**

Name:	Donzel	Vorname:	Michel
Amt, Firma, Institut:			
Strasse, Nr.:	Feldackerweg 15		
PLZ:	3067	Email:	michel.donzel@bluewin.ch
Ort:	Boll	Telefon:	+41 31 839 71 10
Kanton, Land:	Bern, Schweiz	Fax:	

**Unterschrift Präsident Begleitkommission:**

Boll, den 23.6.2009